EL AMBIGUO EXITO DE LOS HERMANOS WRIGHT • CHINA ESPACIAL

INVESTIGACION y CIENCIA

DICIEMBRE 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MUSCULOS ARTIFICIALES



CUMULOS GLOBULARES JOVENES

TOPOISOMERASAS DE ADN DE TIPO II

ECONOMIA DEL TRABAJO INFANTIL

FUSION EN EL NORTE

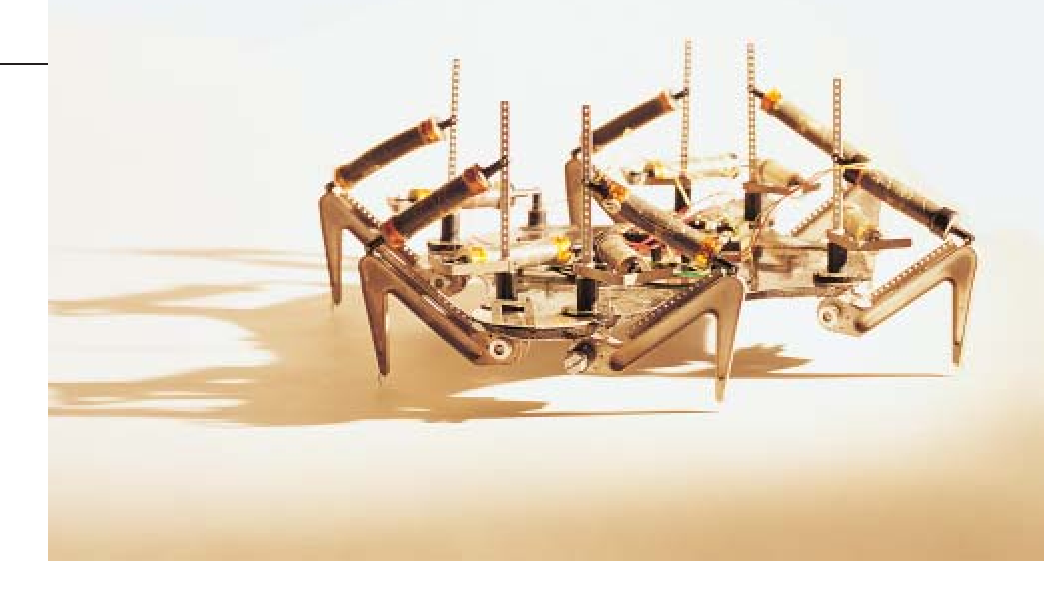
00327
9 770210 136004

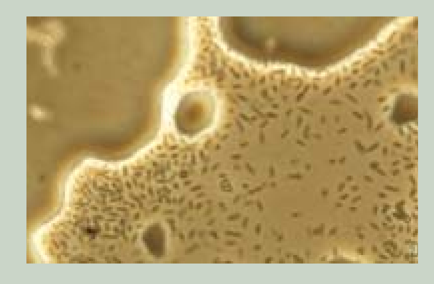


Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Diciembre de 2003

Número 327













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Cúmulos globulares jóvenes*; Manuel Puigcerver: *Fusión en el norte*; Juan Pedro Adrados: *El ambiguo éxito de los hermanos Wright*; J. Vilardell: *China espacial*, *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Economía del trabajo infantil* y *Aventuras problemáticas*; J. M. García de la Mora: *Las cerámicas antiguas de la región mexicana de Occidente*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Kenn Brown

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

RADIOTELESCOPIOS. «En sus primeros días, la joven ciencia de la radioastronomía no consistía sino en captar "ruidos" procedentes del firmamento. Pero hace cosa de un año y medio pudo discernirse una nota aislada, diferenciada del informe ruido de fondo. Hoy, los puestos de escucha de todo el mundo están sintonizados a ese monotono agudo de 1420 megaciclos. Gracias a él va naciendo una nueva imagen del universo. La señal informa del hidrógeno que vaga por el espacio. Uno de los primeros misterios que los nuevos telescopios de hidrógeno (*véase la ilustración*) pretenden aclarar es de qué modo gira nuestra galaxia. Jan H. Oort, H. C. van de Hulst y C. A. Muller han percibido en la Vía Láctea una estructura de nubes de hidrógeno en forma de brazos espirales.»"

LA MENTE MODERNA. «La vida moderna, ¿lleva a muchos a la locura? Para dar con la respuesta cabe examinar la salud mental de una sociedad estable y segura. Los huteritas, miembros de una secta anabaptista norteamericana del Medio Oeste, brindan un laboratorio social ideal. Cooperaron generosamente en aras de la ciencia. No hallamos ni un solo huterita en un hospital mental. Pero esa apariencia de insólita salud mental no pasó la prueba de un escrutinio a fondo de la población. En pocas palabras: la cultura huterita no proporciona inmunidad ante los trastornos mentales. La existencia de esas enfermedades en un orden social tan seguro y estable sugiere que pudieran darse en las personas predisposiciones a la psicosis, genéticas, orgánicas o constitucionales, causantes de depresiones en cualquier sociedad por muy protectora que sea.» —*Joseph W. Earton y Robert J. Weil*

...cien años

VUELO PLANO. «El 17 de diciembre, los señores Orville y Wilbur Wright culminaron con éxito, en Kitty Hawk (Carolina del Norte), sus experimentos con un aeroplano propulsado por un motor de gasolina de cuatro cilindros y 16 caballos de potencia, cuyo peso total sobrepasaba los 300 kilogramos. El aparato arrancó desde la cima de una duna de arena de 30 metros de altura. Una vez suelto, planeó primero hacia abajo, siguiendo la superficie de la pendiente. Luego, conforme las hélices ganaron velocidad, se elevó hasta una altura de unos veinte metros, tras lo cual fue pilotado a lo largo de una distancia de unos cinco kilómetros, contra un viento de 30 kilómetros por hora, a una velocidad aproximada de 13 kilómetros por hora. El señor Wilbur Wright consiguió aterrizar en el lugar por él elegido, sin daños para sí ni para la máquina. Es éste un indudable paso adelante de la navegación aérea con aeroplanos.» [*Nota de los editores: Esta descripción del despegue y del vuelo contiene varias inexactitudes; debió de redactarse a partir de fuentes secundarias. Véase "El ambiguo éxito de los hermanos Wright", en este mismo número.*]

...ciento cincuenta años

VAPORES COMERCIALES. «En la costa sudamericana del Pacífico, los vapores ganan cada vez más adeptos. El congreso chileno acaba de adoptar, con un solo voto en contra, un proyecto gubernamental por el que se establece una línea de vapores entre sus costas y Europa. Se asignan fondos en pro de una línea de barcos, 'con un motor auxiliar de vapor', entre Caldera y Liverpool, con escalas en Valparaíso, el estrecho de Magallanes y Río de Janeiro; cada seis semanas zarparía un buque. La travesía no duraría más de 70 días. La compañía está formada exclusivamente por estadounidenses.»

EL MEJOR AMIGO DEL CIENTÍFICO. «El señor E. Merriam, de Brooklyn Heights (Nueva York), lleva ocho años tomando anotaciones meteorológicas cada hora, de día y de noche, de tres instrumentos. Muchas se han publicado en *Scientific American*. Cuando le preguntaron cómo se las arreglaba para seguir con las anotaciones en las horas nocturnas, respondió: 'Me acuesto a una misma hora. Mi perro se apuesta en la puerta junto al reloj, y en cuanto éste da la hora, araña en la puerta. Me levanto, tomo las notas y en pocos minutos me vuelvo a quedar dormido, hasta que el perro me avisa del paso de otra hora'. Hemos visto a tan inteligente animal y la prueba del trabajo que realiza en la puerta del dormitorio de su amo.»



Nuevo radiotelescopio para cartografiar el cosmos, 1953

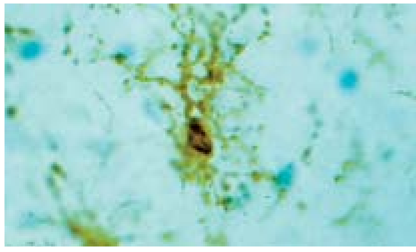
NEUROLOGIA

La enfermedad de Alzheimer quizá no sea una inflamación

Desde hace tiempo se venía observando que quienes toman con regularidad ibuprofen, naproxen u otros fármacos antiinflamatorios no esteroides parecían correr menos riesgo de padecer la enfermedad de Alzheimer. En ese fenómeno basan su hipótesis quienes postulan que un cerebro con Alzheimer es un cerebro inflamado; afirman, además, que se produce cuando las células de la microglía se tornan hiperactivas y atacan a las neuronas sanas. Contra ese planteamiento emergen las investigaciones recientes del equipo de Wolfgang J. Streit, de la Universidad de Florida. Sus resultados indican que podría ocurrir el fenómeno inverso; a saber: las células de la defensa cerebral, las células de la microglía, pierden su capacidad protectora del encéfalo conforme van envejeciendo. Streit comparó tejido cerebral procedente de las autopsias de dos personas no demenciadas, una de 38 años y la otra de 68. En numerosas células de la microglía del sujeto mayor habían desaparecido sus ramificaciones o se apreciaban otras alteraciones. La extensión del desgaste microglial aumentaba en los cerebros de quienes presentaban niveles elevados de la proteína beta-amiloide, un signo de Alzheimer. De ello infiere Streit que esa proteína podría ser la causa de la alteración de la microglía. Tras examinar en su laboratorio cultivos de células de microglía de rata *in vitro*, observaron que los telómeros de sus cromosomas se acortaban en el transcurso del tiempo. Puesto que los telómeros cumplen la función de mantener la integridad génica, conforme ellos se van acortando las células pierden su capacidad de división y se mueren. En consecuencia, si se lograra mantener sanas las células de la microglía, se conseguirían también unas neuronas en perfecto estado. A mayor abundamiento, los pacientes de Alzheimer no parecen mejorar con los antiinflamatorios.

—*Denis Watkins*





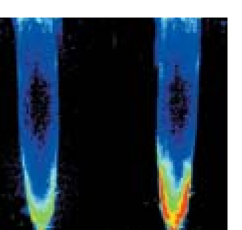
Las células de la microglía de un cerebro joven (arriba) *parecen más sanas que las de un cerebro viejo* (abajo). *La deformación de la microglía se halla asociada a la enfermedad de Alzheimer*

ECOLOGIA

Acabar con la competencia

Las especies invasoras triunfan cuando se apoderan de los recursos naturales y privan de ellos a las endémicas. Hay, sin embargo, un famoso invasor que se impone envenenando al competidor. *Centaurea maculosa* es una mala hierba originaria de Europa oriental. A lo largo del siglo pasado fue sustituyendo a otras especies de América del Norte y degradó sus pastos. Se ha descubierto que las raíces de la invasora exudan una toxina que se acumula en el suelo. El veneno provoca la muerte celular e inhibe la germinación y el desarrollo. Según parece, las plantas europeas habrían frenado la propagación de las semillas al haber adquirido resistencia contra la toxina. Quizá sirva esa base de conocimientos para determinar si las plantas creadas por la ingeniería genética infestan los hábitats.

—*Charles Choi*



Absorción radical de la toxina (en rojo)

ASTROFISICA

Digestión galáctica

Los episodios de fusión configuran las galaxias, transformándolas de espirales en elípticas. Crean, además, nuevos cúmulos estelares. Se dan también fenómenos de absorción, en cuya virtud una galaxia espiral gigante destruye e ingiere una galaxia pequeña cercana. Se trata de un proceso que sigue activo a escala cósmica. Nuestra propia galaxia devora hoy su galaxia satélite más cercana: la galaxia enana esferoidal de Sagitario. Muchas galaxias enanas del Grupo Local, al que pertenece la Vía Láctea, son ricas en hidrógeno neutro. Constituye éste el material principal para la formación de estrellas. Las galaxias que disponen en abundancia de hidrógeno neutro albergan estrellas jóvenes. Pero la enana de Sagitario se nos aparece como un caso especial; aunque no abunda en ella hidrógeno neutro, ha sido sede de gestación estelar a lo largo de los últimos mil millones de años. ¿Dónde está el hidrógeno neutro que falta? Según estudios recientes, la Vía Láctea se lo habría arrebatado. Lo habría arrancado de la enana hará unos 200 o 300 millones de años, mientras atravesaba un borde difuso del disco de nuestra galaxia.

WOLFGANG J. STREIT *Universidad de Florida (arriba)*; JORGE M. VIVANCO *(abajo)*

CLIMA

El tiempo y el fin de semana

La semana laboral parece afectar a las máximas diurnas y a las mínimas nocturnas. La variación termométrica entre el día y la noche se ha estrechado en los últimos decenios. Según Piers M. de F. Foster y Susan Solomon, de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica de Estados Unidos, del registro de cuarenta años de datos termométricos mundiales se deduce la existencia de una oscilación semanal: la variación diurna es unas décimas de grado menor de miércoles a viernes que de sábado a lunes, sobre todo en las áreas urbanas de EE.UU., México, Japón y China. Como ningún fenómeno natural sigue un ciclo de siete días, sospechan que la causa de ese "efecto del fin de semana" es la actividad humana. En concreto, el hollín y los aerosoles de sulfatos expelidos por los vehículos de motor y, en especial, de las centrales térmicas que podrían afectar a las capas de nubes locales, que amortiguan las oscilaciones térmicas. *—Philip Yam*



Los cielos nubosos amortiguan las oscilaciones térmicas

ASTRONAUTICA

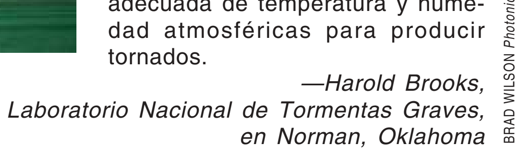
No es fácil explorar Marte

El 4 de enero deberá posarse en el cráter Gusev de Marte la sonda *Spirit*, con un robot todoterreno. El 25 su sonda gemela, *Opportunity*, con el respectivo robot, hará lo mismo en un llano, Meridiani Planum, al otro lado del planeta. La exploración de Marte ha sufrido diversas desgracias. De momento, este par de sondas sigue su camino, pero los responsables de la misión han tenido que sortear ya alguna dificultad. En la comprobación que se hizo en agosto del funcionamiento del espectrógrafo Mössbauer (que identifica las composiciones de las rocas que contienen hierro) que equipa a *Spirit*, apareció un fenómeno inesperado: el mecanismo que obliga a vibrar a una fuente de rayos gamma no exhibía la amplitud de movimiento que debiera. Los resultados de la medición de prueba no acababan, por tanto, de encajar. El mecanismo es ajustable desde Tierra. Aumentando la frecuencia de vibración se ha logrado que el dispositivo no tenga que llegar a ese punto donde tropezaba. El espectrógrafo se concibió ya con tolerancia suficiente para que, en estas nuevas condiciones inesperadas, ofrezca también resultados adecuados. Es posible que la pieza tropezase con un cable desprendido con las sacudidas del despegue. Por otra parte, al Mössbauer de la *Opportunity* le falla una calibración interna, pero dispone también de un calibrado externo.

METEOROLOGIA

¿Por qué se concentran los tornados en determinadas regiones?

¿Por qué se dan con tanta frecuencia en Kansas, Texas y Oklahoma? Debido a la singular geografía de Norteamérica, la parte central de EE.UU. sufre muchos tornados de fuerza y violencia singulares. La combinación del golfo de México en el sur y las montañas Rocosas en el oeste crea las condiciones ideales para que se desarrollen allí tornados con mayor frecuencia que en cualquier otro lugar del mundo. En la semana del 4 al 10 de mayo de 2003, hubo en el centro de EE.UU. más tornados que nunca: casi 300 en 19 estados. Causaron 42 muertes. Las tormentas productoras de tornados se inician en un aire cálido y húmedo cercano al suelo. Por encima (a altitudes de unos tres a 10 kilómetros) habrá aire seco. Cualquier fenómeno que separe ambas masas de aire, elevará el aire cálido y húmedo. Puede tratarse de un frente, de una línea seca —un gradiente de humedades muy estrecho entre vientos de las Rocosas y del Golfo— o de un flujo procedente de otra tormenta. En resumidas cuentas, de una diferencia de cualquier tipo en las propiedades físicas de las dos masas de aire. En esas divisorias pueden producirse rotaciones: los "retorcimientos". Una corriente ascendente de aire que atraviese un retorcimiento intensificará la rotación, al modo de un patinador sobre hielo que cierre los brazos.



Resulta más probable que se generen tornados cuando los vientos horizontales del entorno aumentan de velocidad y cambian de dirección con la altitud. En el cambio direccional más corriente de esta clase, los vientos contiguos a la superficie soplan desde el ecuador; los alejados unos pocos kilómetros del suelo, desde el oeste. Cuando se da este patrón eólico en el centro de EE.UU., los vientos de la superficie fluyen desde el golfo de México, aportando un aire cálido y húmedo. Los vientos altos, por contra, vienen de las montañas Rocosas y son más secos. Como resultado, cuando los vientos que soplan en la parte central de EE.UU. presentan las características óptimas para formar tormentas, a menudo combinan además la distribución adecuada de temperatura y humedad atmosféricas para producir tornados.

—Harold Brooks,
Laboratorio Nacional de Tormentas Graves,
en Norman, Oklahoma

BRAD WILSON *Photonica (arriba)*; HOWARD B. BLUESTEIN *(abajo)*

Cúmulos globulares jóvenes

Se pensaba que los cúmulos globulares de estrellas contaban entre los objetos más antiguos del universo. Ahora se sabe de la juventud de muchos

Stephen E. Zepf y Keith M. Ashman

Las estrellas dispersas por la galaxia semejan cortijos en una gran llanura. Separadas por distancias inmensas, apenas se perturban unas a otras. Ciertas regiones, los cúmulos galácticos, recuerdan, sin embargo, más a la ciudad que al campo: en ellos se hacina del orden de un millón de estrellas en un volumen que en otras partes quizá no albergaría ni una. Son además muy viejos. Los casi doscientos de la Vía Láctea contienen algunas de las estrellas más añosas del universo; jóvenes, no se ve que las haya. Como si los cúmulos globulares fueran ciudades antiguas, parecidas a los barrios históricos de Roma y Estambul, formados hace mucho y que no han cambiado apenas, municipios abigarrados y gastados, que nos dirían mucho sobre tiempos pasados, pero muy poco sobre la organización de las galaxias modernas.

O al menos eso creíamos. Ultimamente ha habido que reescribir mapas galácticos y libros de texto. Gracias al Telescopio Espacial Hubble se han encontrado las luces de nuevas y muy activas urbes. Los cúmulos globulares siguen formándose hoy día: cuando dos galaxias colisionan. Este descubrimiento aclara algunas de las preguntas clave de la astronomía, así la de cuándo y cómo se originan y evolucionan las galaxias de gran masa.


RON MILLER

EL CHOQUE DE DOS GALAXIAS tiene grandes consecuencias; pocos sucesos en el universo traen tantas consigo. Este dibujo muestra una colisión vista desde una atalaya ideal: un viejo cúmulo globular (*superpuesto*) de la periferia de una de las galaxias afectadas. Se creía que no había más que cúmulos globulares viejos, constituidos hacia el principio de la historia cósmica, pero según los últimos descubrimientos las colisiones galácticas siguen creándolos.




NGC 1316: una galaxia después del choque

Se sabía de la ubicuidad de los cúmulos globulares; se encuentran en casi todas las galaxias. Con pocas excepciones, las edades y composiciones de las estrellas que los integran se parecen. Debió de constituirlos, pues, el nacimiento casi simultáneo de un gran número de estrellas en una región muy pequeña. En la Vía Láctea, ocurría ello en la época de su mismo origen, por lo que sus cúmulos globulares son ideales para investigar la edad del universo y los procesos de formación galáctica [*véase* "La edad de las estrellas", por Brian C. Chaboyer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2001; y "Así se formó la Vía Láctea", por Sydney van den Bergh y James E. Hesser; marzo 1993]. Los cúmulos globulares de la Vía Láctea se dispersan por un volumen esférico que se extiende más allá del disco plano donde reside la mayor parte de las estrellas. Es posible que esta esfera refleje la anterior conformación de nuestra galaxia; debió de contraerse mucho, mientras se gestaba y durante los primeros tiempos de su evolución.

La vejez de los cúmulos globulares de nuestra galaxia ha mediatizado el estudio de este tipo de agrupaciones en general. Un marciano que se posase sobre una casa donde sólo vivieran octogenarios pensaría que el nacimiento de seres humanos cesó hace 80 años. Así les pasaba a los astrónomos a principios del decenio de 1990. La mayoría de los modelos que intentaban explicar los orígenes de los cúmulos globulares se centraban en las condiciones del universo temprano y suponían que su aparición pertenecía al pasado.

La fusión de galaxias crea cúmulos

Comenzamos nuestro trabajo en este campo hace unos diez años presentando un modelo diferente. Propusimos, como François Schweizer, de los Observatorios Carnegie de Pasadena, y otros investigadores, que la formación de los cúmulos no tenía por qué haber terminado. Quizá la falta de cúmulos más jóvenes era sólo una ilusión debida a unas observaciones limitadas. Sólo los había viejos en nuestra galaxia, pero ¿y en otras galaxias? Cabía dentro de lo posible que se siguiesen formando cuando se dieran condiciones favorables.

Y una circunstancia propicia es el choque de galaxias espirales, con las grandes cantidades de gas de que disponen para crear estrellas nuevas. Aunque entre las galaxias median vastedades, no resulta tan raro que colisionen. Los resultados del impacto inducen cambios de gran magnitud. A menudo, el choque origina brotes de formación estelar: gigantescos, aunque temporales, aumentos en el ritmo de creación de estrellas. Modifica también la estructura de las galaxias involucradas; dos espirales que choquen pueden fusionarse y acabar como una sola elíptica.

Se dudaba que las colisiones galácticas convirtieran las galaxias espirales en elípticas. Alimentaba el escepticismo el mayor número de cúmulos globulares en las elípticas que en las espirales, a igualdad de masa. La simple suma de dos espirales debería mantener constante el número de cúmulos globulares por unidad de masa galáctica. Pero el excedente de cúmulos globulares se explica si la propia colisión crea cúmulos.

Para comprobar nuestro modelo, se observaron galaxias ricas en gas. Había que descubrir si contenían cúmulos globulares recién formados. Fue posible gracias al Telescopio Espacial Hubble. Desembarazado de la atmósfera terrestre, no le costó resolver las galaxias lejanas en cúmulos individuales de estrellas (que antes parecían poco más que motas difusas). Cuando examinó galaxias con brotes de formación estelar, captó cúmulos de estrellas densos y de mucha masa. No diferían en cuanto a tamaño y masa de los cúmulos globulares de la Vía Láctea. Se hallaban tan sólo en regiones de gran actividad. Los choques galácticos, pues, no sólo engendraban estrellas nuevas, sino también nuevos cúmulos globulares.

A pesar de la importancia de esas imágenes en cuanto elemento de juicio, no zanjaban la cuestión. ¿Había acaso seguridad de que esas aglomeraciones parecidas a los cúmulos globulares de la Vía Láctea eran los juveniles de éstos? Se necesitaba una prueba que sentase la relación. Volviendo a nuestra analogía: si el marciano se acostumbrara a un mundo poblado por octogenarios y, de repente, viera un grupo de recién nacidos, pediría pruebas de que aquéllos y éstos pertenecían a un mismo tipo de criaturas.

Jóvenes y viejos son lo mismo

La presencia de dos poblaciones de cúmulos en las galaxias elípticas viejas probaría la vinculación de los cúmulos globulares de otras galaxias con los de la nuestra: si las elípticas nacen del choque y fusión de dos espirales, habrán de contener cúmulos globulares viejos (en un principio asociados a galaxias espirales) y jóvenes (los que se crearon en la colisión).

Resumen/*Grandes bolas de estrellas*

- Los cúmulos globulares son concentraciones de estrellas, con densidades de unos cientos de estrellas por año-luz cúbico. Por mor de comparación, en los alrededores del Sol sólo hay 0,01 estrellas por año-luz cúbico. Hasta hace poco se pensaba que todos eran muy antiguos; sus estrellas servían para establecer un límite superior de la edad del universo.
- Los cúmulos globulares han ido apareciendo a lo largo de toda la historia del universo: los resultados más recientes demuestran que existen cúmulos globulares jóvenes y de edad intermedia. No se originaron todos, pues, en un brote primordial. Se forman siempre que en las galaxias imperen circunstancias violentas. Gracias a ellos vislumbramos qué ocurre cuando las galaxias chocan y se fusionan.

C. GRILLMAIR (IPAC/CALTECH) ET AL., WFPC2, HST, NASA

DIAMANTES EN EL CIELO

ASTRONOMOS AFICIONADOS y profesionales sienten idéntica predilección por los cúmulos globulares. Hace dos años, el Telescopio Espacial Hubble tomó esta imagen de NGC 1850, un cúmulo globular joven de la Gran Nube de Magallanes, galaxia contigua a la Vía Láctea (*derecha*). En general, los cúmulos globulares se hallan dispersos por vastas esferas que rodean a las galaxias espirales —sus "halos"—. Las demás estrellas se encuentran en su mayor parte en el característico disco aplanado (*abajo*) con brazos dispuestos en forma de molinillo (*no visibles en esta imagen de canto*).





Según el modelo que confeccionamos, las galaxias elípticas debían exhibir un número parecido de cada tipo.

También indicamos que los dos tipos de cúmulos se podrían distinguir por su color. Las estrellas de los cúmulos globulares más recientes contienen una fracción mayor de elementos pesados, ya que se construyeron con gas rico en esos elementos, diseminados al morir las estrellas en explosiones de supernova u otros fenómenos. Los elementos pesados escasean en los cúmulos globulares viejos de galaxias espirales como la Vía Láctea. La fracción de elementos pesados determina el color de una estrella. Para dos estrellas de la misma edad, la que tenga un mayor contenido metálico será más roja, en virtud del proceso de desarrollo de las reacciones nucleares en su interior. La fusión en el centro de una estrella genera radiación; la absorbe el gas de la propia estrella, lo que produce una presión de radiación centrífuga. Esta presión impide que la estrella se hunda sobre sí misma por su propio peso. Cuantos más elementos pesados estén presentes, más radiación se absorberá, permitiendo a la estrella mantener su equilibrio a temperaturas más bajas. Una menor temperatura, a la postre, causa un color más rojo.

Desde que lanzamos esta predicción, han analizado los colores de los cúmulos globulares de las galaxias elípticas tanto los telescopios de tierra como el Telescopio Espacial Hubble. Brad Whitmore, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, Arunav Kundu —tras su doctorado, trabaja con uno de nosotros (Zepf) en la Universidad de Michigan— y Søren Larsen y Jean Brodie, de la Universidad de California en Santa Cruz, obtuvieron los resultados definitivos que confirman ese esquema bimodal. La mayoría de estas galaxias presentan dos poblaciones distintas de cúmulos globulares, una azul y otra roja. Este dato corrobora la conexión entre los choques galácticos y la formación de cúmulos globulares.

Encontrar cúmulos de edad intermedia ligaría también los cúmulos globulares jóvenes con los viejos. El problema observacional estriba en que esos sistemas de edad intermedia no difieren mucho de los viejos. En su juventud, los cúmulos globulares brillan con intensidad; reflejan las propiedades de sus grandes estrellas, que evolucionan deprisa y mueren pronto, tras lo cual la evolución estelar sigue un curso más parsimonioso. De ahí la dificultad de percibir las diferencias entre un cúmulo globular de edad intermedia y otro más antiguo; cuesta distinguirlos basándose en el efecto de los elementos pesados.

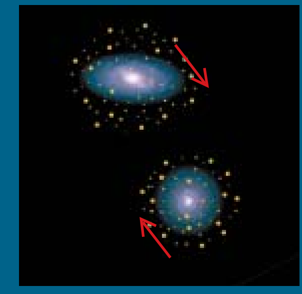
No obstante, hace poco se ha logrado dar con esos cúmulos globulares de edad intermedia en varias galaxias elípticas. Un equipo del que forman parte Zepf,

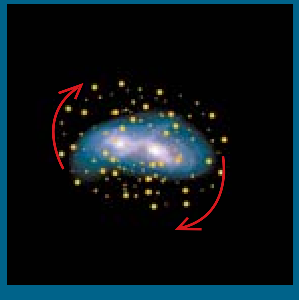
Los autores

STEPHEN E. ZEPF y KEITH M. ASHMAN trabajan juntos sobre los cúmulos globulares desde que coincidieron en Baltimore, Zepf como doctorando de la Universidad Johns Hopkins y Ashman como investigador posdoctoral del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial. Zepf es hoy profesor de física y astronomía de la Universidad estatal de Michigan. Ashman se ha incorporado a la facultad de física de la Universidad de Missouri-Kansas City.

LA CUNA DE LOS CUMULOS GLOBULARES







CUANDO LAS GALAXIAS ESPIRALES se acercan demasiado, chocan y se fusionan. Nuestra Vía Láctea está destinada a correr esa suerte con la cercana Andrómeda en un lapso de varios miles de millones de años. Ambas poseen cúmulos globulares viejos,

Markus Kissler-Patig, del Observatorio Europeo del Sur en Alemania, y Thomas Puzia, del Observatorio de la Universidad de Munich, ha descubierto una nutrida población de cúmulos globulares de edad intermedia en una galaxia elíptica común. Mientras tanto, los estudios de Schweizer, Whitmore, Paul Goudfrooij, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y otros se han centrado en elípticas a las que se atribuye una edad intermedia por su aspecto poco transformado —significa que todavía no han alcanzado la madurez completa— y por la presencia de algunas estrellas jóvenes. Los estudios detallados confirman que estas galaxias también dan cobijo a cúmulos globulares de edad intermedia.

Densidades sorprendentes

Por tanto, hoy día se conocen cúmulos globulares de todas las edades. Los sistemas más jóvenes, observados en plena fusión de un par de galaxias, cuentan a veces sólo con algunos millones de años de edad, y como mucho con algunos cientos de millones de años. Y de ahí, pasando por los de edad intermedia, que sumarán unos miles de millones de años, se llega a los viejos de doce mil millones de años, los únicos que se conocían antes.

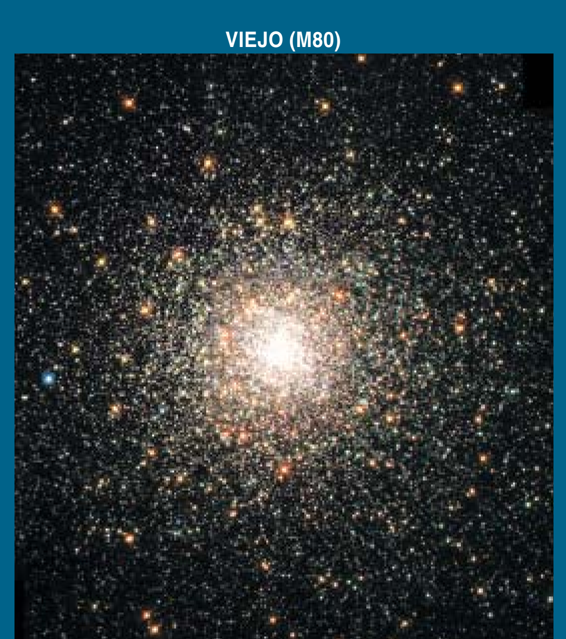
El descubrimiento de los cúmulos globulares jóvenes y de edad intermedia abre una nueva vía para el estudio de estas agrupaciones de estrellas. Antes se consi-

HUBBLE HERITAGE TEAM (AURA/STSCI/NASA) (*arriba, izquierda*); JOHN DUBINSKI *Universidad de Toronto* (*simulación de la colisión*)

TRES GENERACIONES DE CUMULOS GLOBULARES

TODOS LOS CUMULOS GLOBULARES de la Vía Láctea, así M80 (*derecha*), son viejos: sus estrellas tienen casi la misma edad que el universo. Pero la galaxia elíptica NGC 4365 (*centro*) presenta dos variedades de cúmulos: viejos (*círculos rojos*) y de edad intermedia (*círculos azules*). Los cúmulos de Antennae, dos galaxias —NGC 4038 y NGC 4039 (*derecha*)— en colisión, son aún más jóvenes (*recuadro*)

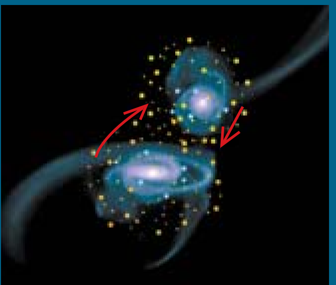
VIEJO (M80)



VIEJOS Y DE EDAD INTERMEDIA (NGC 4365)









formados cuando ellas mismas se constituyeron (*puntos amarillos*). En sus colisiones, las galaxias espirales se precipitan unas sobre otras y se fusionan en una sola galaxia elíptica. Con el choque crece la presión del gas galáctico, lo que desencadena la formación de nuevos cúmulos globulares (*puntos azules*): se han observado galaxias elípticas con dos poblaciones de cúmulos globulares perfectamente diferenciadas.



HUBBLE HERITAGE TEAM (*M80*); OBSERVATORIO EUROPEO DEL SUR (*NGC 4365*); BRAD WHITMORE *Instituto Científico del Telescopio Espacial* (*NGC 4038/4039*)

deraba que su origen se perdía en el oscuro pasado. Ahora, en cambio, se puede investigar su formación de cerca y con detalle. El trabajo realizado ha conducido a grandes progresos y a unas cuantas sorpresas.

El gas está sometido en los brotes de formación estelar a una fuerte presión, entre 100 y 1000 veces más alta que las ordinarias en las galaxias espirales. Comprime el gas hasta que adquiere la densidad necesaria para generar estrellas. De ahí que los procesos que crean estrellas en el disco de nuestra galaxia no produzcan ya cúmulos globulares: la presión ha disminuido demasiado. No sólo los brotes de formación estelar generan altas presiones: puede que el nacimiento de estrellas en el universo temprano calentara las nubes de gas en las galaxias espirales y en las enanas, con el consiguiente aumento de la presión. Ello explicaría que las galaxias enanas y las regiones exteriores de las galaxias espirales tengan cúmulos globulares pese a no haber conocido grandes fusiones galácticas. (Si se hubieran fundido con otras galaxias, ya no serían enanas ni espirales.)

Una de las sorpresas más notables: el tamaño de los cúmulos globulares recién formados parece no guardar relación con su masa. Es decir, una mayor masa no aumenta su extensión, sino su densidad. Se trata de un fenómeno inesperado. En los objetos sometidos a su propia gravedad, como las estrellas y los planetas rocosos, los que más pesan también son los de mayor tamaño. Según la mejor explicación de que disponemos hoy día, los cúmulos menos pesados comenzaron siendo más pequeños que los más pesados y perdieron luego algunas de sus estrellas. La pérdida de masa debilita la ligazón gravitatoria que mantiene unidas las estrellas del cúmulo, razón por la que éste se expande.

Los nuevos conocimientos sobre los cúmulos globulares nos los convierten ahora en instrumentos para seguir los acontecimientos sucedidos en el cosmos tras la gran explosión. Los cúmulos más antiguos son fósiles de una época en que empezaron a nacer estrellas y galaxias en el universo; los más recientes reflejan la evolución galáctica hasta llegar al presente mismo. Unos y otros nos transportan unos y otros por el tiempo y abren nuestros ojos a la rica estratificación histórica de los cielos.

JOVENES (NGC 4038/4039)



Bibliografía complementaria

STAR CLUSTERS. Bruce W. Carney y William E. Harris. Springer-Verlag, 2001.

THE YOUNG, THE OLD, AND THE GLOBULAR: SPECIAL SECTION ON GLOBULAR CLUSTERS. En *Science*, vol. 299, págs. 59-75; 3 enero 2003.

FORMATION OF GLOBULAR CLUSTERS IN MERGING GALAXIES. François Schweizer en *New Horizons in Globular Cluster Astronomy*, dirigido por Giampaolo Piotto, Georges Meylan, George Djorgovski y Marco Riello. Serie de conferencias de la Sociedad Astronómica del Pacífico, vol. 296, 2003.



1. UN BRAZO ROBOTICO accionado por polímeros electroactivos podría doblar, en un pulso, el brazo de un contrincante humano.

Músculos artificiales

Se aproxima la comercialización de nuevos dispositivos productores de movimiento —accionadores, motores y generadores— basados en polímeros que modifican su forma ante estímulos eléctricos

Steven Ashley



JAMIE KRIPKE

A primera vista, no es más que un juguete de 100 euros este acuario de peces robóticos desarrollado por la compañía Eames en Osaka. Pero encierra un secreto. Los peces de plástico de brillantes colores se autopropulsan a través del agua; a imagen de los reales, los hacen sin mecanismo alguno: sin motores, ni árboles de levas, ni engranajes, ni siquiera baterías. Nadan porque sus órganos de plástico se flexionan hacia atrás y hacia delante, diríase que por decisión propia. Son los primeros productos comerciales basados en una nueva generación de polímeros electroactivos (PEA), es decir, plásticos que se mueven ante estímulos eléctricos.

Durante decenios, los constructores de dispositivos accionadores o generadores de movimiento se han afanado por encontrar un equivalente artificial del músculo. Sin más que cambiar de longitud en respuesta ante una estimulación nerviosa, los músculos ejercen fuerzas dosificadas, capaces de cerrar los párpados o levantar una piedra. Los músculos presentan también invariancia de escala, propiedad que les permite operar con igual eficacia en todas las tallas, razón por la cual se sirven del tejido muscular lo mismo insectos que elefantes. Sería muy útil, pues, disponer de un mecanismo parecido al del músculo para propulsar dispositivos que no admitan fácilmente motores eléctricos, por diminutos que sean.

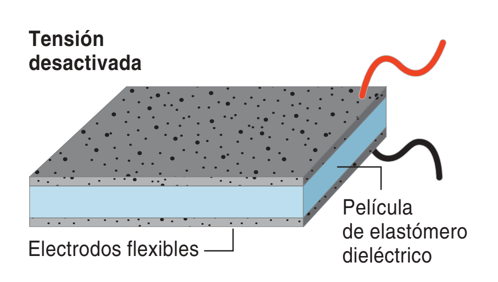
EXPANSION DE UN PLASTICO POR LA ELECTRICIDAD

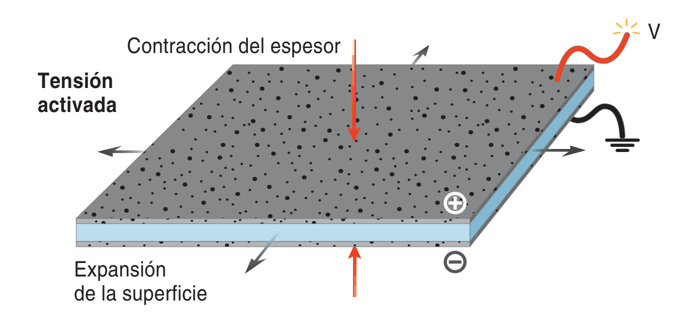
EL MECANISMO FUNDAMENTAL de los nuevos músculos artificiales es bastante elemental. Cuando los elastómeros dieléctricos —siliconas y acrílicos— se someten a la acción de campos eléctricos creados por tensiones elevadas, se contraen en la dirección de las líneas de fuerza del campo y se dilatan perpendicularmente a ellas. Este fenómeno físico se denomina tensión de Maxwell. Los nuevos dispositivos vienen a ser condensadores elásticos: dos placas, dotadas de carga y paralelas, entre las que se interpone un material dieléctrico. Cuando se conectan a la fuente de alimentación, las cargas positivas y negativas se acumulan en los electrodos opuestos. La atracción que ejerce una placa sobre otra oprime el polímero aislante, que responde con una expansión de su superficie.

Sobre las caras anterior y posterior se laminan unas finas capas de elastómero dieléctrico (generalmente, de 30 a 60 micrometros de espesor) que llevan partículas de carbono conductoras suspendidas en una matriz de polímero blando. Al conectarlas a una fuente de alimentación, las capas de carbono actúan como electrodos flexibles que se expanden en superficie juntamente con el material dieléctrico intercalado. Esta lámina de plástico estratificado sirve de base para una extensa gama de dispositivos accionadores, sensores y generadores.

Los elastómeros dieléctricos, que pueden llegar a expandirse hasta cuadruplicar su tamaño de partida, en modo alguno son los únicos tipos de materiales o dispositivos electroactivos, si bien representan varios de los ejemplos más eficaces.

El gráfico de la derecha compara las características de diversos tipos de materiales y dispositivos de accionamiento. Se incluyen productos comerciales que generan movimiento bajo el efecto de la corriente eléctrica y los campos electrostático y electromagnético. La deformación elástica cuantifica el desplazamiento por unidad de longitud que pueden proporcionar los





Se espera que los polímeros electroactivos se conviertan en los músculos artificiales del futuro. A muchas técnicas actuales podrían sustituirles otras opciones fundadas en dichos materiales. Hace unos años, Yoseph Bar-Cohen, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, planteó a los expertos en polímeros electroactivos el siguiente reto: construir el primer brazo robótico capaz de doblar, en un pulso, el brazo de un contrincante humano.

De cuantos empeños se han aplicado, quizás el trabajo más prometedor en PEA sea el realizado por SRI International, laboratorio sin ánimo de lucro establecido en Menlo Park. ¿Qué es lo que se ha propuesto? En un principio, sólo busca reemplazar, en lo posible, el enjambre de motores eléctricos (y otros mecanismos generadores de movimiento) que rodean nuestra vida, por ingenios menores, más ligeros y más baratos, que se basaran en los nuevos accionadores de SRI. En definitiva, conseguir que la nueva técnica revolucione el mercado de la movilidad mecánica.

Resumen/*Polímeros electroactivos*

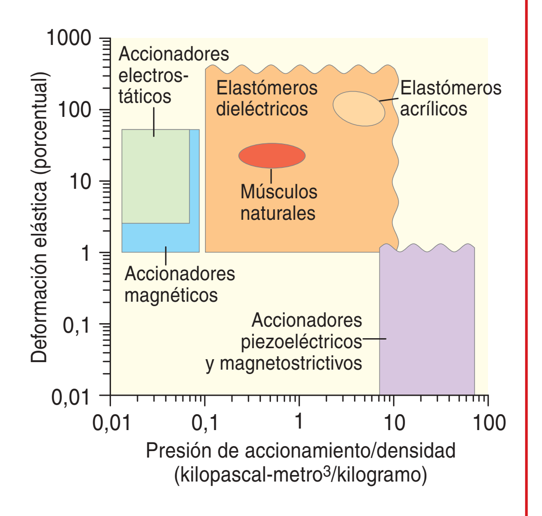
- Desde hace tiempo, físicos y químicos investigan para conseguir materiales ligeros capaces de estirarse o encogerse, en longitud o volumen, cuando se les somete a una estimulación eléctrica. Tales sustancias podrían funcionar como promotores en los novedosos accionadores (dispositivos que generan movimiento) y que tal vez lleguen a reemplazar el motor eléctrico, demasiado voluminoso y pesado para las aplicaciones de pequeña escala.
- Una nueva generación de polímeros electroactivos ofrece una respuesta física a la excitación eléctrica suficiente para impulsar nuevos tipos de accionadores, así como sensores innovadores y generadores de energía. Los productos basados en la técnica del “músculo artificial” se hallan en la antesala del mercado.

Materiales que se mueven

Bar-Cohen, portavoz respetado de cuantos se dedican a la técnica de los polímeros electroactivos, recuerda que, durante mucho tiempo, se han venido ensayando vías y formas de mover objetos sin necesidad de motores eléctricos, demasiado pesados y voluminosos para la mayoría de las aplicaciones. Antes del advenimiento de los PEA, se investigaba sobre todo en las posibilidades de las cerámicas piezoeléctricas. Cuando se somete un cristal de material piezoeléctrico a tensión mecánica, se polariza eléctricamente mediante un proceso reversible: si aplicamos corriente eléctrica, el material se deforma, si lo deformamos, genera electricidad. Imaginemos un disco de titanato circonato de plomo (PZT); la corriente eléctrica pro-

SARA CHEN

dispositivos. El cociente entre la presión de accionamiento y la densidad mide la fuerza que desarrollan. Los elastómeros dieléctricos aventajan a muchas de sus técnicas competidoras en la generación de deformación elástica y de fuerza. Sus propiedades, a este respecto, se asemejan a las de un músculo animal, de ahí que sean llamados "músculos artificiales".



voca que este material piezoeléctrico se contraiga y dilate en una fracción del uno por ciento de su longitud total. El desplazamiento, aunque pequeño, resulta útil, pues un cilindro formado por discos de PZT apilados perforará agujeros de hasta treinta centímetros de profundidad en un bloque de piedra: los discos piezoeléctricos se activan mediante la aplicación de corriente alterna y, en consecuencia, toda la pila vibra a frecuencia ultrasónica, actuando como una masa que percute la roca maciza a gran velocidad. Pese a esta notable eficacia de la cerámica piezoeléctrica como dispositivo accionador, la mayoría de las aplicaciones exigen materiales electroactivos cuya deformación alcance mayores dimensiones.

Plásticos que reaccionan

Podemos dividir en dos grupos los polímeros cuya forma cambia en respuesta ante estímulos eléctricos: los de tipo iónico y los de tipo electrónico. Cada grupo presenta ventajas y desventajas.

Entre los PEA iónicos se numeran los polímeros iónicos en estado de gel, compuestos ionoméricos de polímero y metal, polímeros conductores y nanotubos de carbono. Operan de acuerdo con principios de la electroquímica: la movilidad o la difusión de los iones dotados de carga. Su principal ventaja es que pueden alimentarse directamente a partir de baterías, puesto que incluso con diferencias de potencial inferiores a diez volt se curvan de una forma apreciable. De entre sus inconvenientes reseñaremos que la mayoría de los PEA iónicos necesitan estar húmedos y, por tanto, deben protegerse con revestimientos herméticos flexibles. Además, sobre todo en el caso de los compuestos ionoméricos de polímero y metal, el material sigue moviéndose mientras se le aplica electricidad; si la diferencia de potencial supera cierto nivel, se produce una electrólisis que lo daña irreversiblemente.

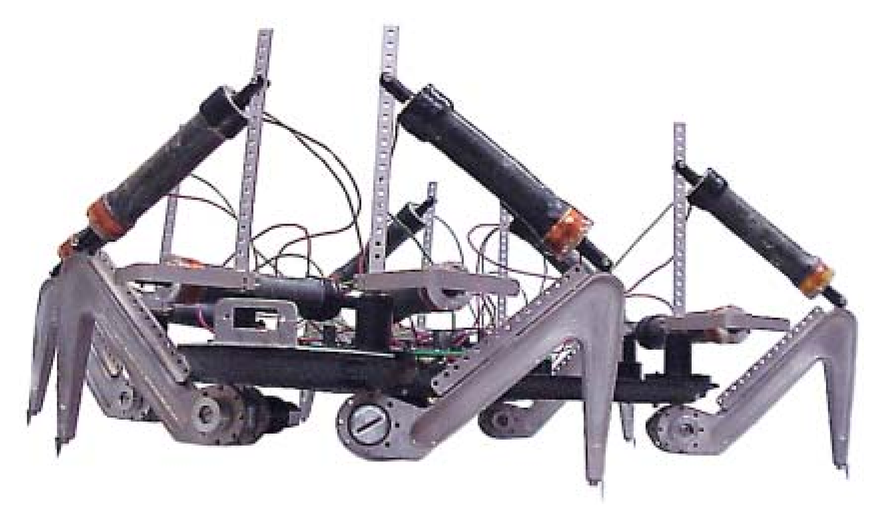
Pertenecen al grupo de los PEA electrónicos los polímeros ferroeléctricos, electretos, elastómeros dieléctricos y elastómeros injertados electrostrictivos. Responden a campos eléctricos. Su mayor desventaja estriba en que requieren tensiones de alimentación bastante elevadas, que pueden producir descargas eléctricas molestas. Pero tienen a su favor que reaccionan con rapidez, suministran fuerzas mecánicas de notable magnitud, no necesitan revestimiento protector y apenas si requieren corriente para mantener una posición determinada. El material utilizado en los músculos artificiales de SRI pertenece al grupo de los PEA electrónicos.

Electrizar el caucho

SRI International empezó a trabajar sobre músculos artificiales en 1992, a raíz del contrato firmado con un programa de micromáquinas japonés. El proyecto en cuestión concernía a una nueva técnica de microaccionadores. Se comenzaron a explorar materiales capaces de producir movimiento que se asemejasen al músculo natural en cuanto a fuerza, alargamiento y deformación elástica (desplazamiento por unidad de longitud o de superficie). Tras examinar todo un abanico de posibles técnicas de accionamiento, se optó por los polímeros electrostrictivos, materiales cuyas moléculas de hidrocarburos se ordenan en redes semicristalinas que presentan propiedades semejantes a las piezoeléctricas.

Todo plástico aislante, pensemos en el poliuretano, sometido a un campo eléctrico se contrae en la dirección de las líneas de fuerza del campo y se dilata perpendicularmente a ellas. Este fenómeno, que no debe confundirse con la electrostricción, se denomina tensión de Maxwell. Los polímeros más blandos que el poliuretano experimen-

SRI INTERNATIONAL



2. COMO SI DE UN INSECTO SE TRATARA, el robot "Flex" camina sobre patas propulsadas por músculos artificiales cilíndricos.

tan una contracción mayor al someterse a una atracción electrostática y, por tanto, proporcionan deformaciones mecánicas mayores. Trabajando con siliconas blandas, los expertos del SRI no tardaron en obtener deformaciones bastante aceptables, del 10 al 15 por ciento. En posteriores investigaciones consiguieron aumentar estos valores hasta el 20 y 30 por ciento. Para distinguir a los nuevos materiales de accionamiento, se les impuso el nombre de elastómeros dieléctricos a siliconas y otros plásticos más blandos; también se les llamó polímeros accionados por campo eléctrico.

Una vez identificados varios polímeros prometedores, el trabajo se centró, a lo largo de ese decenio de los noventa, en los pormenores de la fabricación de acuerdo con la aplicación específica del aparato. Por aquel entonces, las subvenciones y las directrices de investigación que recibía SRI provenían, en buena proporción, de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA) y de la Oficina de Investigación Naval, interesadas en pequeños robots de reconocimiento y generadores de energía de poco peso, con fines militares.

En cuanto los elastómeros empezaron a presentar deformaciones mayores, se vio que los electrodos deberían expandirse también, pues los electrodos metálicos estándares no pueden estirarse sin romperlos. Andando el tiempo se crearon electrodos flexibles, constituidos por partículas de carbono incluidas en una matriz elastomérica. Al expandirse junto con el plástico, estos electrodos mantienen el campo eléctrico entre ellos, a través de toda la zona activa. En esencia, tales dispositivos no son más que condensadores (dos placas paralelas y dotadas de carga entre las que se interpone un material dieléctrico): cuando se conectan a la fuente de alimentación, las cargas positivas y negativas se acumulan en los electrodos opuestos; su atracción mutua comprime el polímero aislante, que en consecuencia aumenta de superficie. Este concepto, patentado por SRI International, fue esencial para el desarrollo inmediato de la técnica basada en músculos artificiales.

Se habían identificado ya varios materiales interesantes y no se lograba, sin embargo, un funcionamiento aceptable en dispositivos

CILINDROS CON RESORTE, SERPIENTES Y BRAZOS ROBOT

EL USO DE POLIMEROS EXPANSIBLES por estímulo eléctrico permite construir accionadores cilíndricos que se estiran o curvan a voluntad. El primer paso consiste en enrollar dos capas de elastómero dieléctrico (que llevan láminas de electrodos flexibles adosadas por ambas caras), formando cilindros compactos. Normalmente estas capas envuelven un resorte helicoidal comprimido que mantiene una elevada tensión previa circunferencial sobre el material de las mismas, que mejora el comportamiento del dispositivo. Las posibles aplicaciones de estos cilindros con resorte son múltiples: accionadores para mecanismos robóticos y protésicos, válvulas, bombas y, en general, cuanto requiera un simple movimiento lineal. Hasta la fecha, los accionadores cilíndricos han producido fuerzas de hasta 30 newton, alargamientos cercanos a dos centímetros y frecuencias de repetición superiores a 50 hertz. Para aumentar las prestaciones mecánicas, habrá que perfeccionar la técnica o conectar múltiples accionadores en serie o en paralelo.

Con modificaciones relativamente sencillas se consiguen dispositivos que se curvan a voluntad. Para ello se imprimen electrodos de una configuración especial en la película de elastómero dieléctrico, de tal manera que el cilindro incorpore dos accionadores, uno a cada lado de la dirección longitudinal, que se activan por separado. Si sólo se conecta tensión a la mitad izquierda, ésta se alarga mientras la derecha permanece inactiva y, por consiguiente, el dispositivo se curva hacia la derecha (*debajo*). De modo inverso, si se excita únicamente la mitad derecha, el cilindro se curva hacia la izquierda. Si se excitan ambas mitades, el cilindro entero se alarga. Mediante otras configuraciones de electrodos independientes es posible generar movimientos más complejos. Las aplicaciones de estos cilindros flexibles incluyen manipuladores y robots serpiente, catéteres y endoscopios orientables, robots articulados y mecanismos de apuntamiento de antenas.

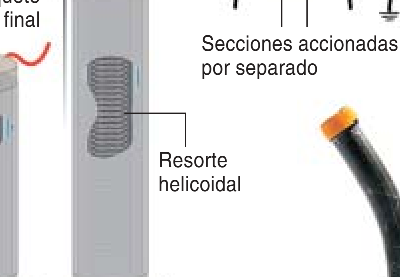
Tensión desactivada

Tensión activada

V

Secciones accionadas por separado







SARA CHEN (*ilustraciones*); JAMIE KRIPKE (*fotografías*)

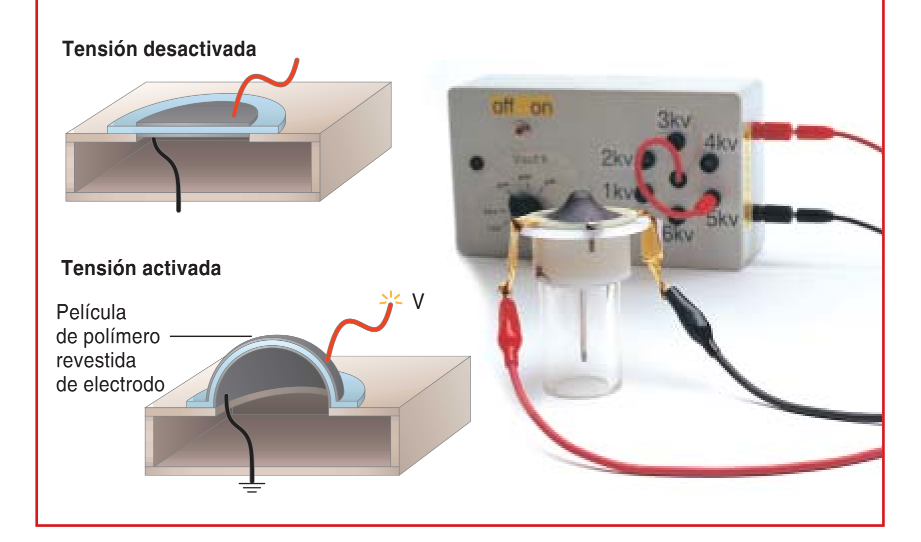
de carácter práctico. Así las cosas, en 1999 se produjeron dos descubrimientos que merecieron la atención del gobierno norteamericano y de la industria. El primero surgió de la observación del comportamiento de los polímeros, que mejoraba enormemente si se sometían a estiramiento antes de su activación eléctrica. Sin conocer bien la causa, se vio que el pretensado orientaba las cadenas moleculares según el plano de expansión y además aumentaba la tenacidad en esa dirección.

El segundo descubrimiento resultó de las pruebas que los investigadores realizaban sistemáticamente con todos y cada uno de los materiales extensibles que les llegaban a las manos. Entre las muestras, un polímero destacaba por su elasticidad. Resultó ser un elastómero acrílico, capaz de suministrar enormes deformaciones y energías de impacto (hasta un 380 por ciento de deformación elástica).

A partir de estos dos hallazgos, los elastómeros dieléctricos se empezaron a aplicar a dispositivos accionadores de interés industrial.

BOMBEO DE MEMBRANAS

LOS ACCIONADORES DE DIAFRAGMA se construyen tensando películas de elastómero dieléctrico sobre una abertura enmarcada por una estructura rígida. De ordinario, el diafragma está ligeramente abombado en un sentido (hacia arriba o hacia abajo) por la acción de un resorte, una ligera presión del aire, un almohadillado o cualquier otro medio. Se consigue así que el diafragma actúe en un solo sentido, en lugar de deformarse al azar cuando se le aplica tensión eléctrica. Dado que estos accionadores pueden desplazar volumen, resultan adecuados para bombas o altavoces. Durante mucho tiempo se han utilizado otras técnicas de impulsión como las de base piezoeléctrica, pero los diafragmas de elastómero dieléctrico ofrecen desplazamientos mayores. En algunos diseños el diafragma se deforma desde la posición inicial plana a una forma convexa (*abajo*).



SARA CHEN (*ilustraciones*); JAMIE KRIPKE (*fotografías*)

Del laboratorio al mercado

El grupo de SRI adopta un enfoque general flexible que abarca muchos diseños y polímeros diferentes. Para producir el efecto de accionamiento se utilizan diversos polímeros, acrílicos y siliconas inclusive. Hasta el caucho natural sirve en cierta medida. En las temperaturas extremas del espacio exterior, por ejemplo, la mejor solución sería construir músculos artificiales de plásticos con silicona, que se han experimentado en el vacío a –100 grados centígrados. Para aplicaciones que exijan fuerzas mayores, se debería añadir polímero o colocar varios dispositivos en serie o en paralelo.

Los accionadores de elastómero dieléctrico se alimentan con tensiones bastante elevadas, de uno a cinco kilovolt; puede, pues, operar con corrientes muy débiles (para las potencias habituales, a tensiones elevadas corresponden bajas intensidades). Asimismo, se utilizan conexiones más finas, menos costosas y que apenas se calientan. Mientras no se llegue al punto en que el campo eléctrico produzca ruptura y circule corriente entre los electrodos, al aumentar la tensión se consigue una expansión y una fuerza mayores.

Una tensión elevada podría resultar problemática en el caso de los dispositivos móviles, ya que las baterías suelen ser de baja tensión y se necesitarían, por tanto, circuitos de conversión suplementarios. Si bien Qiming Zhang y su equipo, de la Universidad estatal de Pennsylvania, han conseguido rebajar las tensiones de activación de determinados polímeros electrostrictivos al combinarlos con otras sustancias para crear materiales compuestos. En cuanto a la durabilidad, todo parece indicar que los accionadores de elastómero dieléctrico de SRI resistirán el tiempo requerido por una aplicación comercial de su género.

Aunque los músculos artificiales resulten notablemente más ligeros que los motores eléctricos —los propios polímeros tienen igual densidad que el agua—, en SRI también se trabaja para reducir su masa buscando alternativas a la estructura externa que pretensa el polímero, relativamente pesada.

Fabricación de dispositivos

Tras el desarrollo de un mecanismo básico, el grupo de SRI inició los trabajos sobre toda una gama de aplicaciones que se describen a continuación.

Accionadores lineales. En torno a un resorte helicoidal se enrollan en varias capas unas láminas de elastómero dieléctrico pretensado. El re-

sorte aporta una tensión previa circunferencial, mientras que, en sentido longitudinal, el pretensado de la película mantiene el resorte comprimido. Al aplicar la tensión eléctrica, la película de polímero se comprime en espesor y se relaja en longitud, de tal manera que el dispositivo se extiende. Por consiguiente, estos cilindros con resorte generan una fuerza y una elongación considerables en un paquete compacto. Estos mecanismos podrían llegar a sustituir, por ejemplo, muchos de los pequeños motores eléctricos que se encuentran en el interior de los vehículos, tales como los que regulan la posición del asiento y los que controlan, mediante válvulas, los motores sin levas de alto rendimiento.

Cilindros flexibles. Al mismo cilindro con resorte anterior se pueden conectar electrodos con el fin de conseguir dos o más secciones distintas, direccionadas individualmente, en torno de la circunferencia. La activación eléctrica de una de las secciones hará extender esa cara del cilindro, con lo que el dispositivo entero se curvará hacia el lado contrario. En este diseño podrían apoyarse los mecanismos articuladores de movimientos complejos, difíciles de lograr por medio de motores, engranajes y acoplamientos al uso. Otras aplicaciones de interés se hallarían en catéteres médicos orientables y en robots serpiente.

Accionadores recíprocos. Pueden disponerse pares de láminas de elastómero dieléctrico o de cilindros con resorte en configuración contrapuesta; vale decir, que trabajen el uno contra el otro en un movimiento recíproco y, por consiguiente, respondan de manera más lineal (cada entrada produce una salida). Al transferir la tensión eléctrica de un dispositivo a otro se puede desplazar el montaje entero hacia atrás o adelante; al activarlos simultáneamente, el conjunto se torna rígido en un punto neutro. De este modo, los accionadores se comportan como el bíceps y tríceps, músculos que controlan los movimientos del brazo humano.

Altavoces. Si se aplica tensión eléctrica a una película de elastómero dieléctrico tensada sobre un armazón en el que exista una abertura, ésta se extenderá y se contraerá emitiendo sonido. Con esta configuración se puede construir un altavoz plano, ligero y económico, cuyo diafragma cumpla a la vez las funciones de promover y generar sonido. Los diseños actuales funcionan bien en las gamas de frecuencias medias y altas. Todavía no se ha optimizado la configuración del altavoz para frecuencias bajas, si bien no hay obstáculos que impidan su buen funcionamiento en esa gama.

Bombas. El diseño de una bomba de diafragma de elastómero dieléctrico es análogo al de un altavoz de baja frecuencia al que se le haya añadido una cámara de fluido y dos válvulas de sentido único para controlar el flujo de líquido. Los músculos artificiales resultan indicados para propulsar bombas de microfluidos; así, en los dispositivos que reproducen un laboratorio en un chip, tan apreciados por la medicina y la industria.

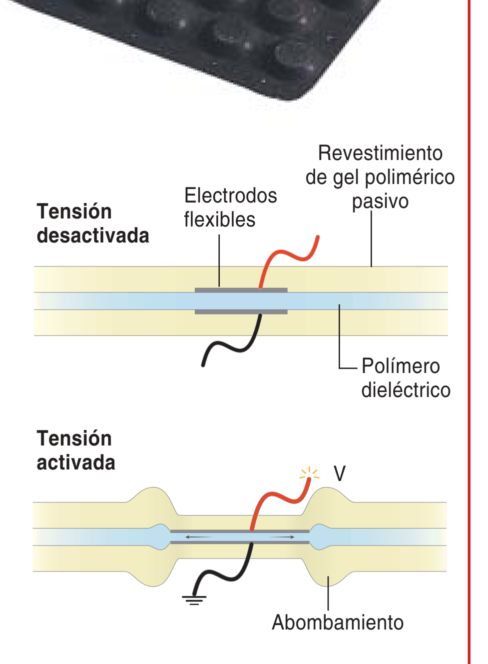
Sensores. Dada su naturaleza, todos los dispositivos elastómeros dieléctricos de SRI modifican su capacidad eléctrica cuando se curvan o se estiran. Resulta, pues, factible construir un sensor capaz de funcionar a tensiones eléctricas bajas. Tales sensores podrían utilizarse para medir la tensión mecánica del cinturón de seguridad; asimismo, podrían incorporarse en la fabricación de telas, fibras, cintas o revestimientos.

Texturas y superficies controlables. Si en los polímeros se imprimen diseños de electrodos, podrán crearse a voluntad redes de puntos o formas diversas sobre una superficie. Esta técnica podría utilizarse para conseguir un auténtico tejido de camuflaje activo, capaz de cambiar su reflectancia según se

SUPERFICIES DE TEXTURA CONTROLABLE

CAMBIAR la textura de una superficie puede resultar una estrategia muy útil en numerosos casos. Entre sus aplicaciones se encuentran la alteración de la reflectancia de los materiales de camuflaje militar activo y el control de la circulación de aire o de agua sobre las superficies de aviones y barcos. Los sistemas que dependen del tacto, o hápticos, podrían fundarse en los cambios de textura.

La mayoría de los accionadores se sirven de las grandes deformaciones que se producen en el plano de la lámina. Las alteraciones del espesor, en cambio, son inapreciables. Sin embargo, si se revisten las películas de elastómero dieléctrico y los electrodos flexibles con una capa mucho más gruesa y blanda de gel polimérico, los cambios de espesor pueden amplificarse hasta resultar perceptibles. A medida que la película se dilata en el plano, el gel se extiende junto con ella y se acumula en los puntos donde sufre compresión el elastómero.



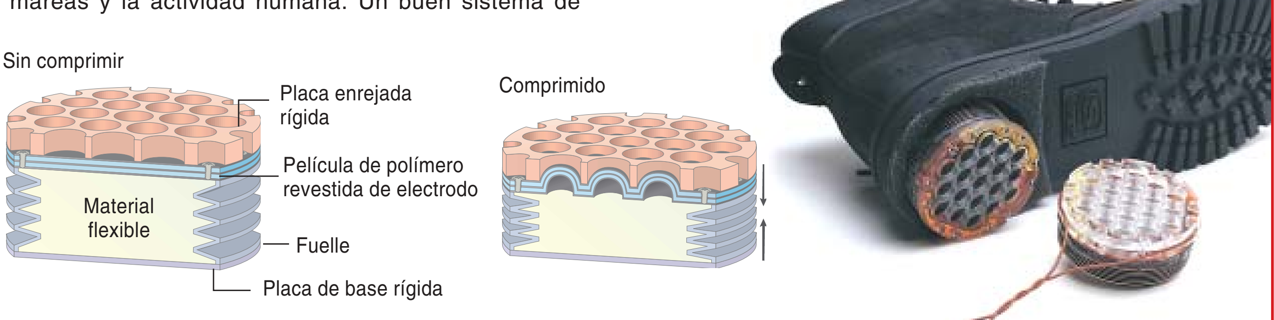
SARA CHEN (*ilustraciones*); JAMIE KRIPKE (*fotografía*)

ELECTRICIDAD A GOLPE DE TACON

LOS ELASTOMEROS DIELECTRICOS están capacitados para generar energía eléctrica. En el modo generador, se origina una tensión eléctrica a través de un elastómero que se deforma bajo la acción de una fuerza externa. Cuando la forma del elastómero cambia, se altera también la capacitancia efectiva del dispositivo y se genera energía eléctrica mediante los circuitos electrónicos apropiados. Estos materiales utilizados como generadores poseen una elevada densidad de energía, lo que permite construir dispositivos más ligeros que los basados en otras técnicas.

Los elastómeros dieléctricos resultan especialmente indicados para las aplicaciones en las que la energía eléctrica se obtiene de movimientos relativamente grandes, como son los producidos por el viento, las mareas y la actividad humana. Un buen sistema de generación de energía eléctrica portátil consiste en captar la energía compresora que produce el tacón del calzado al golpear el suelo mientras andamos o corremos. Esta energía es neta en el sentido que el dispositivo no representa ninguna carga adicional para el usuario. El generador de "golpe de tacón" transforma de manera efectiva la compresión del tacón en la deformación de un conjunto de diafragmas multicapa.

El objetivo de las investigaciones actuales es desarrollar un dispositivo que genere potencias de un watt durante la marcha normal. Una unidad en cada zapato proporcionaría electricidad suficiente para alimentar, por ejemplo, un teléfono móvil.



desee, o bien para crear pequeños canales superficiales que mejoren la penetración aerodinámica característica de las alas de los aviones.

Generadores de energía. Dado que estos materiales se comportan como condensadores blandos, a partir de ellos también pueden construirse generadores de capacitancia variable y colectores de energía autopropulsados. La DARPA y el ejército estadounidense han financiado el desarrollo de un generador que funcione "a golpe de tacón", una fuente de energía portátil que los soldados y el personal de campaña podrían utilizar en lugar de baterías para alimentar sus aparatos electrónicos. Mediante este nuevo mecanismo, una persona de complexión mediana que avanza a un paso por segundo podrá generar alrededor de un watt de potencia. Estos dispositivos podrían incorporarse al calzado, a las bandas de las mochilas o a componentes de la suspensión de un coche. En principio, el método es también aplicable a los generadores mareales o eólicos.

Recientemente se ha sometido a prueba un sistema todavía más novedoso: los "motores de polímero". Se quemó propano en el interior de una cámara y la combustión generó tal aumento en la presión, que distorsionó un diafragma de elastómero dieléctrico, generando así electricidad. Estos dispositivos podrían culminar en el diseño de generadores eficaces y extremadamente pequeños (de no más de un centímetro de tamaño).

Mientras los investigadores del SRI afirman estar listos para construir el anhelado brazo mecánico capaz de doblar, en un pulso, el brazo de un contrincante humano, los ingenieros aún no han empezado a familiarizarse con la nueva técnica. La comercialización de los productos basados en polímeros electroactivos está todavía por llegar.

SARA CHEN (*ilustraciones*); JAMIE KRIPKE (*fotografía*)

Bibliografía complementaria

HIGH-SPEED ELECTRICALLY ACTUATED ELASTOMERS WITH OVER 100 % STRAIN. Ron Pelrine, Roy Kornbluh, Qibing Pei y Jose Joseph en *Science*, vol. 287, págs. 836-839; 4 de febrero, 2000.

ELECTROACTIVE POLYMER (PEA) ACTUATORS AS ARTIFICIAL MUSCLES: REALITY, POTENTIAL, AND CHALLENGES. Dirigido por Yoseph Bar-Cohen. SPIE Press Monograph, vol. PM98; 2001.

POLYMER ACTUATORS. Peter Sommer-Larsen y Roy Kornbluh en *Proceedings of Actuator 2002*. 8th International Conference on New Actuators, Bremen, Alemania; junio de 2002.

AN ALL-ORGANIC COMPOSITE ACTUATOR MATERIAL WITH HIGH DIELECTRIC CONSTANT. Q. M. Zhang et al. en *Nature*, vol. 419, págs. 284-287; 19 de septiembre, 2002.

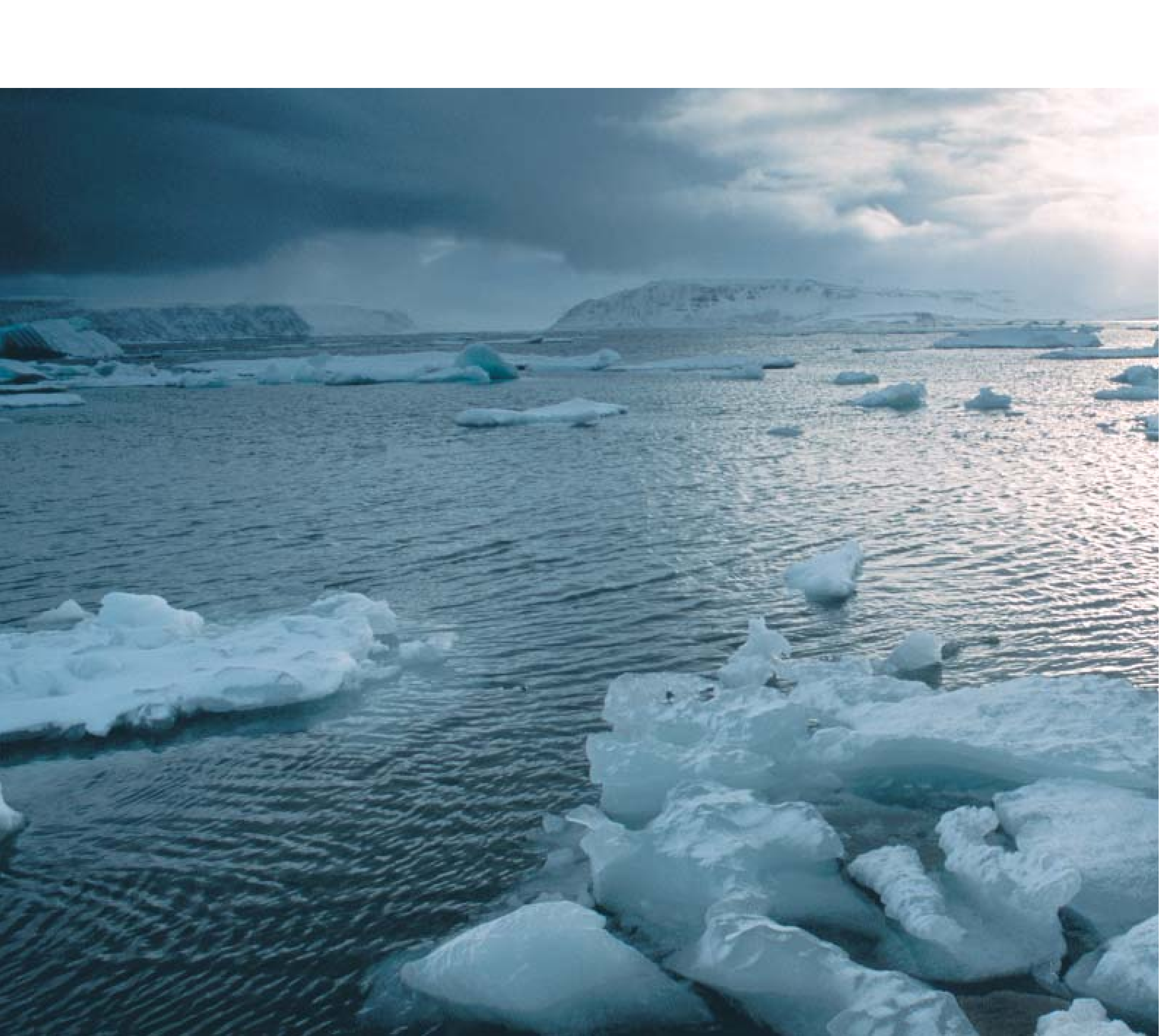
ENGINEERING A MUSCLE: AN APPROACH TO ARTIFICIAL MUSCLE BASED ON FIELD-ACTIVATED ELECTROACTIVE POLYMERS. Roy Kornbluh et al. en *Neurotechnology for Biomimetic Robots*. Dirigido por Joseph Ayers, Joel Davis y Alan Rudolph. MIT Press, 2002.

SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2003: ELECTROACTIVE POLYMER ACTUATORS AND DEVICES (PEAAD). Dirigido por Yoseph Bar-Cohen en *Proceedings of the SPIE*, vol. 5051; 2003.

Fusión en el norte

Los hielos marinos y los glaciares se funden,
el permafrost se derrite y la tundra cede terreno a los arbustos.
¿Cómo afectarán esos cambios al Artico y al planeta entero?

Matthew Sturm, Donald K. Perovich y Mark C. Serreze



Los cristales de hielo se me clavan en el rostro, me cubren la barba y se adhieren al cuello de mi parka. Cuando el viento arrecia, me cuesta ver a mis cinco compañeros a través de la ventisca. Llevamos 800 kilómetros de un viaje de 1200 en vehículo de nieve a través de la Alaska ártica. Hemos venido aquí en este final del invierno de 2002 para medir el espesor de la capa de nieve y estimar su capacidad aislante, un factor importante en la conservación del equilibrio térmico del permafrost. He pedido que nos paremos un momento para que decidamos qué vamos a hacer. Con este viento cada vez más fuerte y esta temperatura de –35 ºC, no nos queda más remedio que buscar abrigo, y pronto. Pongo la cara contra la capucha del compañero que tengo más cerca y grito: "Asegúrate de que vamos todos agrupados. Tenemos que salir de esta cresta expuesta al viento".

—Matthew Sturm

Impresiona la lista: las temperaturas del aire más altas en cuatro siglos, la contracción de la capa de hielos de los mares, una fusión de la cubierta de hielo de Groenlandia de una magnitud nunca vista y los glaciares de Alaska contrayéndose a velocidades jamás registradas. Añádanse a esto el creciente volumen de agua descargado por los ríos rusos, una estación de crecimiento en el Artico que lleva alargándose varios días por decenio y el permafrost, que empieza a derretirse. Estas observaciones, consideradas en conjunto, anuncian, como ninguna medida suelta podría hacerlo, que el Artico experimenta una profunda transformación. Hasta qué punto, sólo se ha comprendido en los últimos diez años, al compararse los descubrimientos de diferentes disciplinas. Hoy colaboran los especialistas de unas y otras a fin de calibrar las ramificaciones de esos cambios y predecir qué les espera al Artico y al resto del globo.

Lo que descubran tendrá importancia planetaria, porque el Artico controla el clima en un grado fuera de proporción. De manera parecida a como el aliviadero de una presa mantiene o modifica el nivel del agua, las regiones polares controlan el equilibrio térmico de la Tierra. Como se absorbe más energía solar en los trópicos que en los polos, los vientos y las corrientes oceánicas transportan sin cesar calor hacia los polos, donde la enorme cobertura de nieve y hielo determina su destino. Mientras esta cobertura tan reflectora permanezca íntegra e inmensa, la luz solar que incide di-



LA REDUCCION de los hielos marinos es uno de los índices más impresionantes de los cambios que está experimentando el océano Artico. La superficie total cubierta por los hielos ha caído en un tres por ciento por decenio en los últimos treinta años. El espesor ha disminuido todavía más en ese período; en algunos lugares, hasta un 40 por ciento. La imagen muestra el Artico cerca de Rusia.

GALEN ROWELL *Corbis*

rectamente sobre el Artico se reflejará y volverá en su mayor parte al espacio; el Artico se mantendrá frío y constituirá un depósito del calor llegado desde latitudes más bajas. Pero si la cobertura empieza a fundirse y contraerse, reflejará menos luz solar y el depósito ártico irá perdiendo su eficacia; el clima del planeta entero acabará por hacerse más cálido.

Inferir qué pasará tropieza con un sinfín de complicaciones. La mayor de ellas la plantea el intrincado sistema de realimentaciones que rige el clima en el Artico. Algunas son positivas; amplifican el cambio y convierten un leve efecto en un fenómeno mayúsculo. Otras son negativas; frenan el sistema y mitigan las transformaciones.

De esos procesos, el principal es la realimentación de albedo y hielo (*véase el recuadro* "Una complicada tela de araña"): el aumento de las temperaturas produce inviernos más cortos y mantos de hielo y nieve más delgados, con efectos fluctuantes que llegan a las latitudes medias. Otra realimentación parte de la gran provisión de carbono congelado en el Artico en forma de turba. A medida que el clima se vuelve cálido y la turba se derrite, se libera dióxido de carbono a la atmósfera, gas que favorece, mediante el efecto invernadero, el calentamiento no sólo sobre el Artico, sino en todo el globo.

No conocemos bien el discurrir de esas realimentaciones cuando se las toma por separado, no digamos ya cuando se consideran las interacciones entre unas y otras. Sí sabemos cuán complicado es el Artico entendido como sistema. En cuanto se altera un factor, los demás reaccionan; a veces de una manera que contradice a la intuición.

Calentamiento

Cuanto más miramos, más cambio vemos. Las temperaturas del aire en el Artico han subido 0,5 grados por decenio a lo largo de los últimos 30 años. El aumento tiene lugar sobre todo en invierno y primavera. Los archivos indirectos (los testigos de hielo y turba, los sedimentos de los lagos), cuyos datos se refieren a las temperaturas de verano, ponen este calentamiento reciente en perspectiva. De ellos se deduce que las temperaturas más altas de los últimos 400 años son las de fines del siglo XX y comienzos del XXI. Nos informan también del calentamiento que las ha llevado a tal nivel, incesante desde que el Ártico salió de la Pequeña Edad del Hielo —el período frío que acabó hacia 1850—, y de su impresionante aceleración en el último medio siglo.

El mismo fenómeno se refleja en muchas otras series cronológicas. Desde el fin de la Pequeña Edad de Hielo, los hielos de los ríos y lagos del hemisferio norte han venido formándose más tarde y fundiéndose antes. Los cubre el hielo 16 días menos que en 1850. Cerca de la casa en Alaska de uno de nosotros (Sturm), un premio de unos 300.000 dólares espera a quien adivine la fecha en que el río Tanana se deshelará cada primavera. La fecha ganadora media se ha adelantado unos seis días desde que la apuesta se instituyó en 1917. Las imágenes tomadas por los satélites muestran que el tiempo que el Artico está libre de nieve se ha alargado varios días por decenio desde 1970; la estación de crecimiento, cuatro días.

Los glaciares se contraen y el permafrost se deshiela

Mi primera investigación sobre el cambio climático del Artico no encerraba grandes complicaciones: tenía que llegar a un pequeño glaciar de la isla Ellesmere, perforar agujeros en el hielo, clavar allí largos mástiles metálicos, medir cuánto sobresalían, volver un año más tarde y comprobar si se veía más mástil.

Instalamos la mayor parte de la red de mástiles en el cálido verano de 1982. En 1983 volvimos a un mundo muy diferente; vivimos allí semana tras semana de frío, nieve y niebla. Parecía el comienzo de una nueva edad del hielo. Teníamos pensado volver cada año, pero como ocurre con tanta frecuencia, se acabaron las subvenciones y mis experimentos árticos se convirtieron en queridos recuerdos.

Pero los recuerdos a veces reviven. En 2002 me llamaba un emocionado estudiante de doctorado. Había visitado el glaciar. Estaba deshaciéndose rápidamente. El año 1983 fue una anomalía. Seguían todavía mis mástiles, pero caídos sobre la superficie de la nieve. ¿Hasta qué profundidad los había clavado? ¿Guardaba mis notas de campo? Sí. Vuelvo ahora a Ellesmere para ver qué queda del glaciar que en 1983 parecía un accidente permanente del paisaje, pero que, quizá muera antes que yo.

—Mark C. Serreze

Sorprende también la lección de los glaciares árticos. En Alaska se vienen retirando desde hace cincuenta años; impresiona aún más que se haya triplicado la velocidad a que retroceden en los últimos diez. Los glaciares que se funden elevan el nivel del mar unos dos milímetros por decenio, un diez por ciento de su ascenso anual total de 20 milímetros. Determinar el estado del casquete de hielo de Groenlandia, mucho más extenso y de más lenta

Resumen/*Calentamiento ártico*

- Abundan en el Artico indicios de calentamiento. Estos cambios repercuten en las condiciones del resto del planeta: las regiones polares controlan de manera desproporcionada el balance de calor de la Tierra.
- Una complicada telaraña de sistemas de realimentación climática hace dificilísimo saber si el calentamiento de invernadero es la causa primordial de las transformaciones árticas.
- Pero cualquiera que sea la causa de los cambios, se impone la tarea de predecir lo que nos espera, si no queremos reaccionar ante las consecuencias sólo cuando se estén manifestando ya.



LUCY READING (*ilustración*); DE ARRIBA A ABAJO, EN SENTIDO HORARIO: *CORBIS*; SCOTT T. SMITH *Corbis*; JACQUES LANGEVIN *Corbis Sygma*; GLEN LISTON; VLADIMIR ROMANOVSKY; JIM BRANDENBURG *Minden Pictures*; GALEN ROWELL *Corbis*

transformación, ha venido siendo la meta de los investigadores árticos. Antiguos resultados de campo y de satélites señalaban que la capa de hielo mostraba un comportamiento asimétrico: la parte occidental adelgazaba un poco y la oriental permanecía sin cambios. Las imágenes recientes de los satélites indican que la velocidad de fusión ha ido aumentando en todo el casquete. La superficie total que se derrite en verano ha crecido un siete por ciento por decenio desde 1978; nunca tanto, desde que hay datos, como el verano pasado. Las nevadas invernales no bastan para compensar esta enorme fusión estival: el casquete se contrae.

El permafrost —la capa permanentemente helada bajo la superficie— se está derritiendo también. En un estudio publicado en 1986, investigadores del Servicio Geológico de los EE.UU. registraron los perfiles de temperatura de perforaciones efectuadas por los sondeos petrolíferos en el permafrost de Alaska septentrional. Cuando extrapolaron los perfiles hasta la superficie, hallaron una curvatura anómala. Obedecía a un calentamiento del suelo de dos a cuatro grados a lo largo de varios decenios. Resultados más recientes, aún provisionales, indican que desde 1986 se ha registrado un incremento adicional de dos a tres grados. Como el invierno ártico dura nueve meses del año, la cobertura nival controla el estado térmico del suelo y la temperatura del aire, de modo que los resultados de esas perforaciones reflejan casi con certeza un cambio en la cantidad y duración de las precipitaciones invernales, así como un aumento de la temperatura. Más nieve significa una capa aislante de mayor espesor y, por tanto, mejor protección del suelo frente a las gélidas temperaturas invernales. Un suelo que no se enfría tanto en invierno, queda en mejores condiciones para calentarse más en verano.

Sea cual sea la causa, una cosa es cierta: la fusión del permafrost creará problemas. Producirá fallos catastróficos en carreteras, casas y otras infraestructuras. Guarda además relación con otro cambio descubierto hace poco: a lo largo de los últimos 60 años, la cantidad de agua que los ríos rusos vierten al océano Artico ha crecido un 7 por ciento, cantidad equivalente a alrededor de la cuarta parte del volumen del lago Erie o al agua que vierte en tres meses el Mississippi. Se atribuye este cambio, en parte, a unas mayores precipitaciones invernales y, en parte, a un calentamiento del permafrost y la capa activa, que está transportando ahora, se cree, más aguas subterráneas. Esta entrada de agua dulce podría tener importantes consecuencias para el clima mundial: el paleoarchivo

da a entender que cuando la salida de aguas de la cuenca ártica alcanza un nivel crítico de baja salinidad, la circulación oceánica cambia radicalmente. Y cuando tal mutación sucede, cambia también el clima; el sistema de circulación —un sistema de ríos que cursan por el océano, como la corriente del Golfo— es uno de los más importantes sistemas de transporte de calor en dirección norte, hacia el polo.

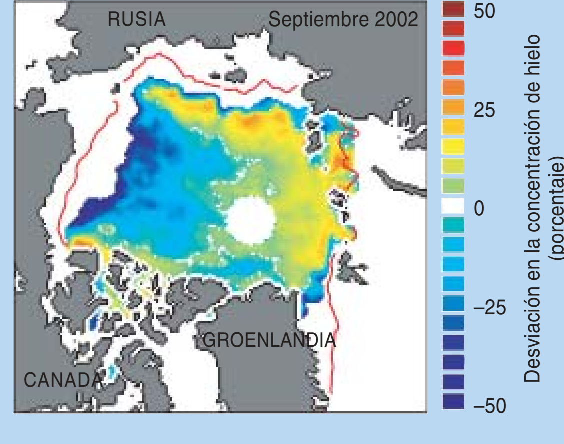
Reverdece el Artico

También la cobertura terrestre del Artico se está alterando. Se ha experimentado con el calentamiento en invernaderos; se sabe así que con un clima más tibio los arbustos crecen a expensas de otras plantas de la tundra. Bajo unas mismas condiciones favorables para su crecimiento, la zona arbórea avanza hacia el norte. Se han buscado ambas transformaciones en el mundo real, pero la reacción de los ecosistemas puede tardar. Sólo en los últimos años, comparando fotografías modernas con otras tomadas hace medio siglo, y mediante satélites que captan la cuantía creciente de la superficie foliar, se ha constatado que ese par de modificaciones está, en efecto, teniendo lugar. Cuando se altera la vegetación, cambia también el papel del Artico en el ciclo global del carbono. Bajo la tundra de Alaska y Rusia hay vastos depósitos de carbono en forma de turba. Prueban que durante largos períodos la tundra fue un sumidero neto de carbono: hoy guarda alrededor de 2400 kilómetros cúbicos. En años recientes, el calentamiento ha invertido la situación: el Artico parece ahora una fuente neta de dióxido de carbono. No es un cambio muy notorio, pero sí preocupante, porque el dióxido de carbono y el metano constituyen los principales gases de invernadero en la atmósfera; le devuelven calor a la Tierra en lugar de permitir que escape al espacio.

Esa inversión se debe, entre otros factores, a que los inviernos se hayan entibiado. Con un aire más caliente abundan más las precipitaciones, en parte en forma de nieve. Una capa de nieve más espesa retiene más calor en el suelo, lo que da lugar a que se dilate el período en que la tundra libera dióxido de carbono. Pero a medida que la tundra deje paso a una vegetación arbustiva y el suelo se reseque más en verano como resultado de unas temperaturas mayores, el balance quizá cambie de nuevo en sentido contrario, porque las plantas, par-

LOS HECHOS

SE CUENTA HOY con la ventaja de muchos años recogiendo datos sobre el Artico. Las configuraciones deducidas de esos registros revelan que la tendencia hacia el calentamiento es mucho mayor de lo que sería de esperar si el clima estuviera siguiendo una tendencia natural que condujese de la Pequeña Edad Glacial a un régimen de temperaturas menos bajas: no cabe descartar, pues, que la causa sea el calentamiento de invernadero.



EL MINIMO de la cantidad de hielos marinos se midió en septiembre de 2002; la línea roja muestra la cobertura media de hielos para esa época del año. Los colores indican la desviación de la concentración de hielos respecto a la norma histórica. Por ejemplo, las áreas de azul oscuro del norte de Alaska corresponden a concentraciones de hielo entre un 30 y un 40 por ciento más bajas que el valor medio para esa época del año.



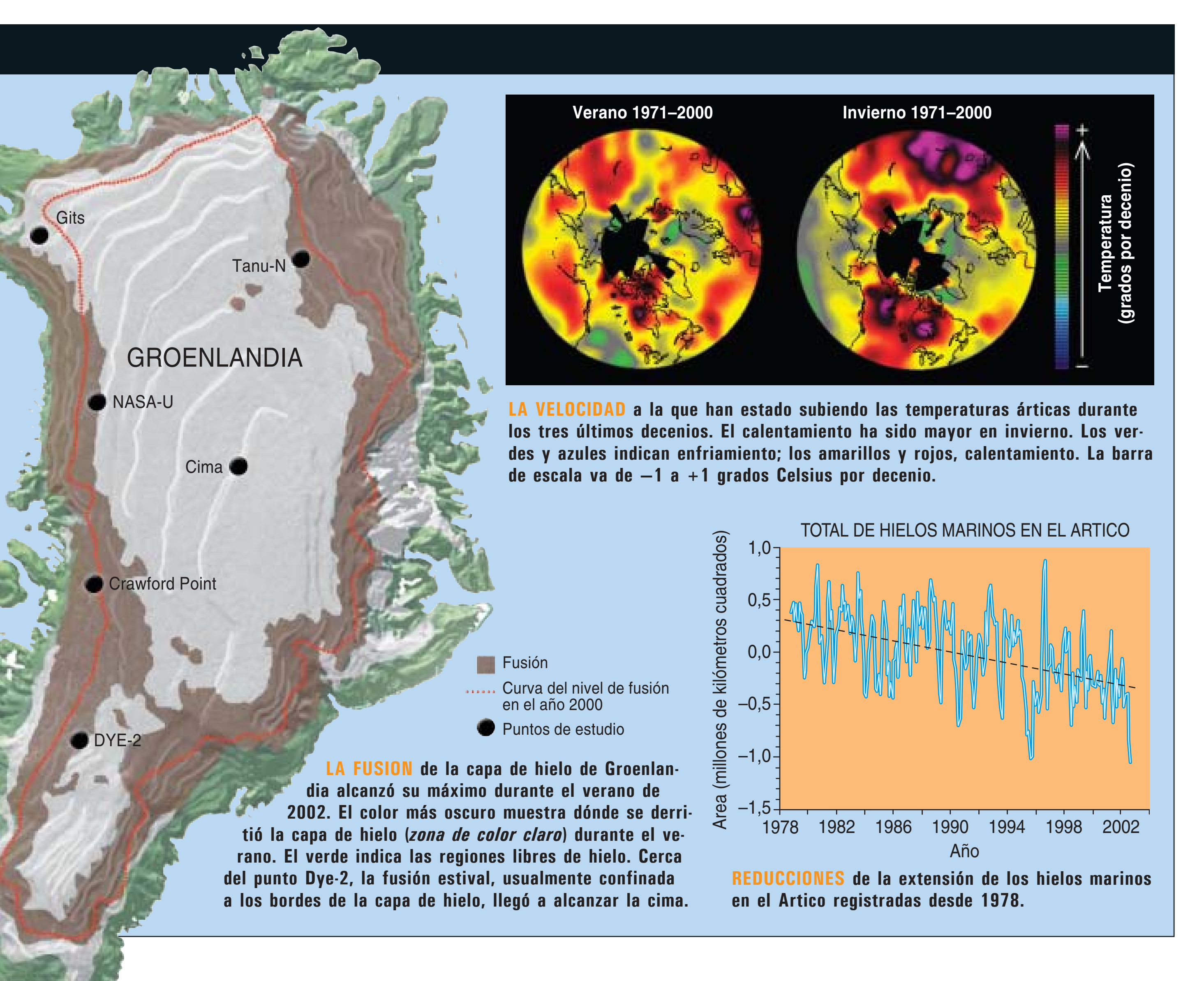


LA INVASION DE LA TUNDRA por los arbustos (*bandas oscuras*) a lo largo del pasado medio siglo queda de manifiesto en estas fotografías tomadas en un mismo lugar, cerca del río Chandlar, en Alaska, en 1949 y 2001.

MARK C. SERREZE *ET AL.*, 2003 (*mapa*); LA ARMADA DE LOS ESTADOS UNIDOS (1949); KEN TAPE (2001)

Los autores

MATTHEW STURM, DONALD K. PEROVICH y MARK C. SERREZE han investigado durante la mayor parte de sus carreras la nieve, los hielos y el clima del Artico. En 16 años en el Laboratorio de Investigación e Ingeniería de Regiones Frías del Ejército de los EE.UU. en Alaska, Sturm ha dirigido más de una docena de expediciones invernales por el Artico de Alaska, incluyendo una muy reciente travesía de 1200 kilómetros en vehículo de nieve de un lado a otro de la región. Perovich pertenece a la oficina de New Hampshire del Laboratorio de Investigación e Ingeniería de Regiones Frías del Ejército de los EE.UU. Su trabajo se ha centrado en los hielos marinos y en la realimentación de albedo y hielo. Fue jefe científico de la Base Polar SHEBA, un rompehielos arrastrado por los hielos árticos durante un año. Desde 1986, Serreze es miembro del Centro de Datos de la Nieve y el Hielo de la Universidad de Colorado en Boulder. Sus estudios han puesto de relieve el cambio climático ártico y las interacciones entre los hielos marinos y la atmósfera.



LA VELOCIDAD a la que han estado subiendo las temperaturas árticas durante los tres últimos decenios. El calentamiento ha sido mayor en invierno. Los verdes y azules indican enfriamiento; los amarillos y rojos, calentamiento. La barra de escala va de –1 a +1 grados Celsius por decenio.

LA FUSION de la capa de hielo de Groenlandia alcanzó su máximo durante el verano de 2002. El color más oscuro muestra dónde se derritió la capa de hielo (*zona de color claro*) durante el verano. El verde indica las regiones libres de hielo. Cerca del punto Dye-2, la fusión estival, usualmente confinada a los bordes de la capa de hielo, llegó a alcanzar la cima.

REDUCCIONES de la extensión de los hielos marinos en el Artico registradas desde 1978.

LUCY READING, *FUENTE:* K. STEFFAN Y R. HUFF (*mapa*); CHAPMAN Y WALSH, 1993, ACTUALIZADO HASTA EL PRESENTE POR CHAPMAN (*mapas de temperatura*); LUCY READING, *FUENTE:* CENTRO DE DATOS DE LA NIEVE Y EL HIELO, BOULDER, COLO. (*gráfica*)

ticularmente las leñosas, fijarán más carbono y lo almacenarán en el ecosistema ártico. Según estudios recientes, la magnitud y dirección del balance ártico de carbono dependerá del período de tiempo que examinemos; la respuesta variará a medida que los vegetales se adapten a las nuevas condiciones.

La fusión de los hielos marinos

"Es ridícula la delgadez de esta capa de hielo sobre el mar", pensaba yo mientras pisaba el hielo por segunda vez aquella mañana de agosto de 1988. No corría peligro: el equipo personal de flotación se había convertido ya en un accesorio ineludible. La fina capa de hielo preocupaba por otras razones.

Mi viaje a este lugar a 715 kilómetros del polo norte había comenzado diez meses antes, a bordo del rompehielos Des Groseillers. *Dejamos intencionadamente que los hielos lo aprisionasen; queríamos que lo arrastrasen el año entero. Ibamos a estudiar la realimentación de albedo y hielo y la realimentación de radiación y nubes. Cuando iniciamos el viaje, me sorprendió la finura de la capa. Ahora, tras un período veraniego de fusión mucho más largo de lo esperado, había adelgazado todavía más, aun cuando habíamos estado derivando hacia el norte. No estaba seguro de qué llegaría primero, si el final del verano o el final del hielo. No podía imaginarme que ese verano estuviese estableciendo la marca de mínima cobertura de hielo en todo el océano Artico occidental. Por desgracia para la supervivencia a largo plazo de la capa de hielo, la marca se superó en 2002.*

—Donald K. Perovich

De los cambios que hemos catalogado, ninguno alarma tanto, ni de lejos, como la reducción del manto ártico de hielo marino. Quienes siguen esta alteración han descubierto que el área cubierta por los hielos ha ido disminuyendo en un tres por ciento por decenio desde que se empezó a tomar datos con satélites, en 1972. Este ritmo parecerá lento para una inversión financiera, pero cuando el tiempo se

mide en siglos o milenios, resulta muy rápido. Con el hielo cubriendo una superficie semejante al área de los Estados Unidos, esa reducción por decenio equivale a una superficie más extensa que la mitad de España: más de un cuarto de millón de kilómetros cuadrados. La variación del espesor del hielo (determinada con submarinos) llama todavía más la atención: se ha perdido hasta un 40 por ciento en los últimos decenios. Según algunos modelos climáticos, hacia 2080 el océano Artico estará libre de hielos en verano.

A diferencia de la fusión de los glaciares, la fusión de los hielos marinos no eleva el nivel del mar: los hielos están ya flotando. Sin embargo comporta un doble motivo de alarma. Localmente, la pérdida del hielo marino conduce a la pérdida de un ecosistema marino único, repleto de osos polares, focas y ballenas. Globalmente, un océano Artico libre de hielos sería el extremo final de la realimentación del albedo: se absorbería mucha más radiación solar, no sólo en el Artico, sino, con el tiempo, en cualquier lugar del planeta.

La contracción de la cobertura marina de hielos no ha escapado a la atención de empresarios, turistas y políticos. Se ha discutido la viabilidad de transportar mercancías por aguas árticas, a través incluso del legendario Paso del Noroeste. Roald Amundsen, el intrépido explorador polar noruego, tardó más de tres años en cruzar el Paso —era la primera vez que se conseguía— en 1906, cuando el Artico estaba todavía bajo la influencia de la Pequeña Edad del Hielo. Muchos lo habían intentado antes. En los últimos años, sin embargo, docenas de buques han completado la ruta, incluso rompehielos rusos adaptados para el turismo. Sería impensable, ni con rompehielos, si se diesen las duras condiciones de hace 100 años.

UNA COMPLICADA TELA DE ARAÑA

Los muchos sistemas de realimentación que funcionan en el Artico convierten la predicción del futuro estado de la región en un difícil problema. La realimentación de albedo y hielo es el primero entre todos esos sistemas. Opera como sigue: la tierra, el océano y el hielo reflejan una fracción de la radiación solar incidente, que escapa hacia el espacio y no contribuye a hacer el clima más cálido. Esta fracción se llama albedo. Una superficie con albedo unidad refleja toda la luz; una superficie con albedo nulo no refleja nada. En el océano Artico se dan casi todos los valores intermedios. Donde está helado y cubierto de nieve, su albedo supera al de cualquier materia natural (vale alrededor de 0,85), pero donde está libre de hielos ofrece el más bajo, unos 0,07.

A fines de primavera la capa de hielo está cubierta de nieve brillante y blanca. La superficie refleja la mayor parte, pero no la totalidad, de la luz incidente. Parte del hielo se funde, su borde retrocede y en lugar del brillante, reflector hielo cubierto de nieve aparece la oscura agua oceánica, muy absorbente. Además, lejos del borde oceánico, la fusión de la nieve produce charcos de agua que también tienen un albedo bajo. La fusión del hielo en ambas partes reduce el albedo, lo que conduce a una velocidad de fusión más alta, y así sucesivamente.

Si la realimentación de albedo y hielo operase aisladamente, sería posible, incluso ahora, predecir sus ramificaciones sobre el clima global. Pero no sucede así. Actúan concertadamente múltiples realimentaciones, algunas positivas y otras negativas; es difícil valorar su efecto neto. Por ejemplo, que el albedo se reduzca debería hacer el clima más cálido; ahora bien, una atmósfera más tibia puede contener más vapor de agua: la cobertura nubosa aumentará. Las nubes actúan como una sombrilla que reduce la cantidad de luz solar que llega a la superficie (lo que da por resultado un enfriamiento), pero también aprisionan la radiación de onda larga procedente de la superficie, como una manta (lo que da por resultado un calentamiento). En invierno el efecto neto está claro:

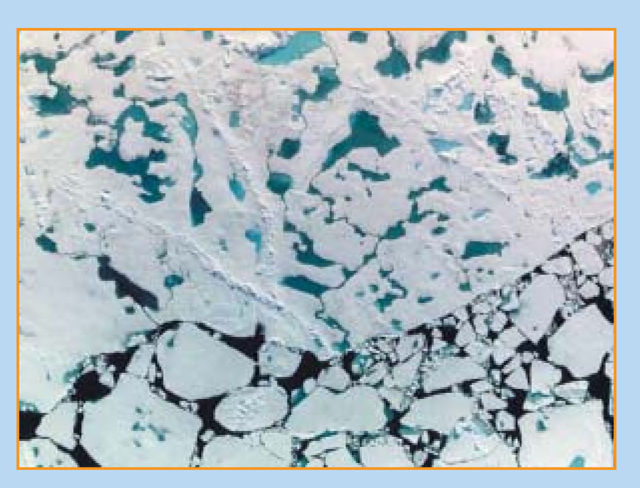


IMAGEN A VISTA DE PAJARO de hielo marino que se derrite: el agua de color turquesa procede de la nieve derretida sobre la superficie del hielo y es dulce; el agua casi negra es la del océano. Ambas absorben mucho más calor que el brillante hielo.

no hay luz solar ni sombrilla; sólo está la manta. La realimentación de las nubes es positiva.

Pero, ¿qué ocurre en el verano, cuando abunda la luz solar? Los estudios de campo han mostrado que la realimentación depende de la naturaleza de las nubes. Para las nubes altas y delgadas, compuestas principalmente de hielo, domina el efecto de sombrilla y la realimentación de radiación y nubes es negativa. Para las nubes bajas, de agua líquida, que predominan en verano, el efecto de manta se impone y la realimentación es positiva. Cuando esas nubes bajas estaban presentes, se fundía más hielo que en días soleados.

Se trata ahora de descifrar cuáles, de entre las realimentaciones entrelazadas en la complicada tela de araña del Artico, nos deben preocupar más. Serán las que —como la realimentación de albedo y hielo— puedan amplificar los cambios ya en marcha, acelerarlos y aumentar su magnitud. Los que podrían empujar el sistema más allá del borde del precipicio.

DONALD K. PEROVICH

¿Es el efecto invernadero la causa?

Este inventario de las sorprendentes transformaciones árticas nos conduce a una pregunta: ¿estamos todavía saliendo de la Pequeña Edad del Hielo o sucede algo completamente distinto? Más en concreto: ¿deberíamos atribuir esas variaciones a un aumento de la concentración de los gases atmosféricos de invernadero que predomina sobre un ciclo natural de temperaturas? ¿O forman esos cambios parte de un ciclo natural más largo de lo esperado?

La enmarañada interacción entre unas realimentaciones y otras complica muchísimo estas preguntas. Todavía no sabemos lo bastante para responderlas lo suficiente. Pero sí para preocuparnos.

Cualquiera que sea la causa de la fusión y descongelación que ahora afectan al Artico, esas modificaciones han iniciado una cascada de reacciones de alcance planetario, que continuarán incluso si el clima cesara brusca e inesperadamente de hacerse más cálido. Imagínese el clima como una gran roca redonda que descansa sobre un terreno desigual. El inventario nos dice que ha sufrido un pequeño empujón —sea por un ciclo climático natural o por la actividad humana— y ha comenzado a rodar. Aun cuando el impulso cesase, seguiría rodando. Cuando por fin se detenga, lo hará en un lugar completamente diferente de donde partió.

Para enfrentarse a la constelación de cambios en el Artico de una manera concertada, para desarrollar la capacidad de predecir lo que va a suceder después y no limitarse a reaccionar ante un cambio consumado, varios organismos estadounidenses coordinan sus investigaciones árticas dentro del programa SEARCH (de *Study of Environmental Arctic Change*, Estudio de los Cambios Ambientales en el Artico). Los primeros resultados dan algunas esperanzas de que lleguemos a desentrañar los nexos entre los muy acoplados sistemas que conforman el clima del Artico y, por consiguiente, de la Tierra. Así, un descubrimiento reciente, acerca de las pautas de la circulación atmosférica, explica las enigmáticas configuraciones espaciales de los aumentos de temperatura (*véase el recuadro* "Vientos de cambio"). Igualmente importante es que dispongamos ya de buenos registros del cambio climático que se remontan a 30 o a 50 años atrás.

Gracias a estos registros y a otros hallazgos, deberíamos llegar a determinar si la transformación del Artico es una evolución natural ligada a la salida de la Pequeña Edad Glacial o algo más ominoso. Hemos de comprender las interacciones entre las diversas realimentaciones del sistema ártico, y hacerlo cuanto antes.

VIENTOS DE CAMBIO

Los vikingos sabían que, cuando los inviernos eran suaves en el norte de Europa, solían ser rigurosos en el sur de Groenlandia, y viceversa. Nosotros sabemos que esta variación de temperatura afecta no sólo a Groenlandia y Europa; está relacionada con una configuración de la circulación atmosférica conocida como Oscilación del Atlántico Norte (OAN), que puede ser parte de una configuración todavía mayor, la Oscilación Artica (OA). La OAN describe la variación coordinada de una gran región de baja presión centrada cerca de Islandia con una extensa zona de altas presiones centrada cerca de las Azores. Cuando ambas configuraciones báricas son fuertes, la OAN está en su modo positivo. Cuando ambas son débiles, en el negativo.

Un rasgo clave de la OAN es que los vientos soplan en sentido antihorario alrededor de la depresión de Islandia y, en sentido horario, alrededor del anticiclón de las Azores. En el modo positivo, los vientos alrededor de la depresión de Islandia son más fuertes de lo normal, y el aire cálido del sur fluye sobre Europa septentrional y el norte de Eurasia. Al mismo tiempo, la estructura de la circulación arrastra aire frío hacia el sur, desde el Artico superior hasta parte de Groenlandia, el Atlántico Norte y el nordeste de Norteamérica. Cuando la OAN es negativa, la configuración de vientos se debilita (y a veces puede incluso invertirse), lo que conduce a la distribución opuesta de temperaturas. Desde 1970, la OAN invernal ha quedado en gran parte anclada en el modo positivo; ese fenómeno explica por qué hemos observado un calentamiento general sobre Alaska, el oeste del Canadá y Eurasia, y un enfriamiento regional en el este del Canadá y sur de Groenlandia. Esta situación ha causado también un aumento de las precipitaciones en el norte de Eurasia y ha contribuido a la retirada de los hielos marinos.

LA OSCILACION DEL ATLANTICO NORTE: su modo positivo.

LUCY READING

Bibliografía complementaria

YEAR ON ICE GIVES CLIMATE INSIGHTS. D. K. Perovich y otros en *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 80, n.º 481, págs. 485-486; 1999.

GLOBAL WARMING AND TERRESTRIAL ECOSYSTEMS: A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR ANALYSIS. G. R. Shaver y otros en *Bioscience*, vol. 50, n.º 10, 2000.

OBSERVATIONAL EVIDENCE OF RECENT CHANGE IN THE NORTHERN HIGH-LATITUDE ENVIRONMENT. Mark Serreze y otros en *Climatic Change*, vol. 46, págs. 159-207, 2000.

THE SURFACE HEAT BUDGET OF THE ARCTIC OCEAN (SHEBA). Sección especial en el *Journal of Geophysical Research*, volumen 107, n.º 15, octubre 2000.

CIENCIA Y SOCIEDAD

ADN

de la sustancia a la estructura

Con notable repercusión mediática, el pasado 25 de abril se ha conmemorado el 50 aniversario de la doble hélice, la estructura tridimensional propuesta para el ADN por James Watson y Francis Crick en 1953, hito considerado el punto de arranque hacia la moderna biología molecular.

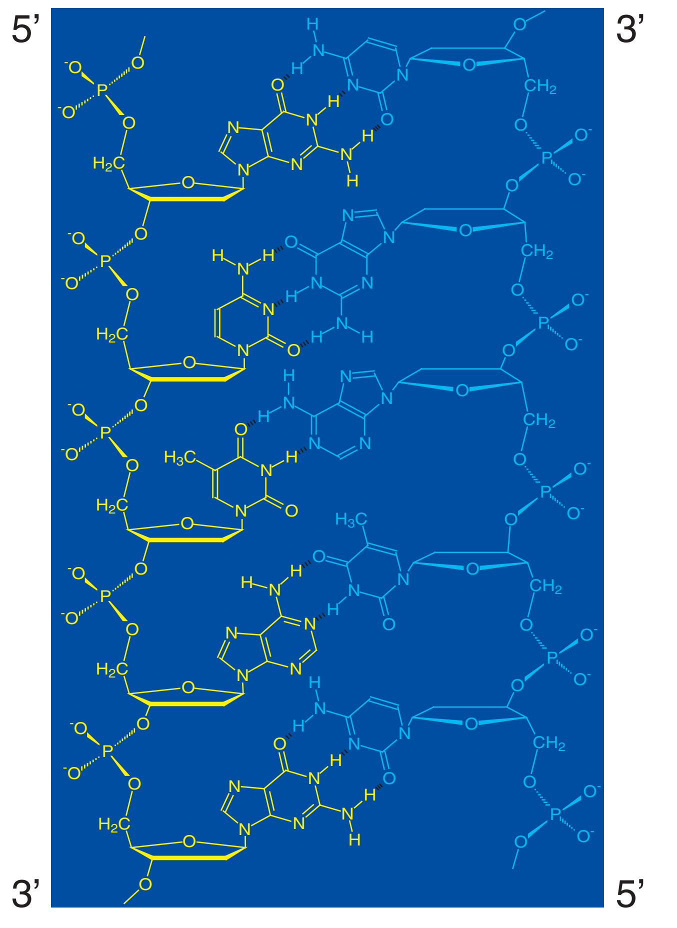
Aunque en este tiempo se ha magnificado su leyenda, la irrupción de la "doble hélice" gozó de algunas saludables virtudes para el ulterior progreso científico; así permitió comprobar que los genes no son entes amorfos con plasticidad múltiple, sino que adoptan una conformación espacial concreta. Demostró una relación directa entre la estructura de las macromoléculas y su función, sugiriendo de inmediato un hermoso mecanismo de replicación, de valor universal en toda la biosfera. Fue la llave que desveló el cristal oscuro de la clave genética: cómo la información codificada en el ADN se transcribe en ARNm y luego éste se traduce en proteínas.

Sin embargo, condición previa y necesaria al hallazgo de la *estructura* es la existencia anterior de la *sustancia* y la averiguación de su naturaleza; es decir, el descubrimiento verificado en 1944 por Oswald Avery, McCarty y McLeod, confirmando que el auténtico elemento portador de la herencia es el ADN y no las proteínas. Esta contribución esencial ha sido lamentablemente olvidada en los recientes fastos venturosos de la doble hélice, reeditando la misma ignorancia injustificable que se produjo con ocasión de su formulación inicial, cuando una gran parte de la comunidad científica no llegó a conocer la enorme magnitud del hecho.

El trabajo de Avery debe enmarcarse en su contexto histórico, hacia 1940 las proteínas eran las moléculas estrella en biología y todo el mundo daba por sentado que los factores hereditarios deberían estar constituidos por proteínas. Su refutación rigurosa de esta premisa fue un hallazgo revolucionario, pero quizá demasiado prematuro y heterodoxo para la doctrina oficial establecida y no recibió el galardón Nobel, que Avery hubiera merecido con toda justicia.

Avery frente a Watson y Crick. Representan el símbolo de dos estilos científicos diametralmente opuestos. Avery realizó una labor metódica de descarte durante más de diez años, repitiendo y analizando experimentos pacientemente, antes de asegurar sin duda la identidad de la *sustancia* hereditaria. Sin embargo, Watson y Crick (que no se conocían antes de su encuentro en Cambridge) entendieron desde el principio que la meta gloriosa residía en la resolución de la *estructura* del ADN y lucharon con ahínco por lograrla. En los dos años escasos e intermitentes de su dedicación, adoptaron la estrategia más corta basada en la construcción de maquetas moleculares donde encajaran los componentes específicos (azúcar, grupos fosfato y los cuatro nucleótidos). De hecho, su indisimulada ambición les condujo a proponer un primer modelo para el ADN, que resultó claramente erróneo. Hoy ya nadie duda que el éxito final de Watson y Crick se debió a la utilización de datos experimentales de sus colegas R. Franklin y M. Wilkins, así como de informes confidenciales ajenos, que les fueron suministrados sin la autorización expresa de sus autores.

Mientras el prudente y recatado Avery publicó con gran cautela un artículo magistral en una revista sin



Disposición espacial en escalera de los componentes del ADN, según el modelo de doble hélice propuesto en 1953 por Watson y Crick. El esqueleto de azúcar-fosfato ocupa el pasamanos de la escalera, mientras las bases se corresponden con los peldaños. La anchura de la hélice tiende a ser constante porque las bases púricas (adenina y guanina) siempre se emparejan con las pirimidínicas (timina y citosina). Las dos cadenas adoptan una orientación opuesta o antiparalela (3’ → 5’ y 5’ → 3’, respectivamente)

excesivo impacto (*Journal of Experimental Medicine*) y luego rehuyó el protagonismo público, Watson y Crick enviaron a *Nature* dos manuscritos casi consecutivos —igualmente clarividentes— con la descripción y las implicaciones biológicas de la doble hélice, se embarcaron en ciclos de conferencias y escribieron libros. Para ellos la fama y la gloria del Nobel; para Avery los modestos honores y el reconocimiento de los pocos privilegiados que supieron captar la verdadera trascendencia de su hallazgo.

Tal y como se nos ha legado, la historia de la doble hélice es una enorme y arbitraria simplificación. La celebración de su 50 aniversario debería servir para reivindicar la memoria y el trabajo singular de un grupo de investigadores injustamente postergados en el devenir de la historia, cuya significación no es menor a la de los dos principales protagonistas. Porque detrás de los descubrimientos están sus autores, los científicos, que estudian con su equipaje de esfuerzo, ambiciones, ilusiones, sufrimientos, éxitos y derrotas; seres humanos al fin y al cabo. Para muchos expertos, el procedimiento empleado, la dedicación sistemática y el sustrato conceptual que supuso el descubrimiento de la *sustancia* representan un avance muy superior a los equivalentes obtenidos en la elucidación de la *estructura*.

JUAN CARLOS ARGÜELLES
Area de Microbiología, Facultad de Biología,
Universidad de Murcia

Contaminaciones por petróleo

Biorremediación

La naturaleza tiene una asombrosa capacidad de regeneración frente a agresiones externas. Por ejemplo, ante contaminaciones por productos químicos. No se trata, sin embargo, de un poder ilimitado. Por eso se han creado técnicas que se proponen estimular el proceso de regeneración. Reciben el nombre genérico de biorremediación.

Todas las técnicas de biorremediación se basan en la utilización de seres vivos, microorganismos por lo común, para eliminar los contaminantes. Los procedimientos varían en razón del compuesto a eliminar y de otros factores. Si en el medio a tratar ya hay microorganismos que degradan, asimilan o transforman el compuesto contaminante, lo mejor es estimular su crecimiento, a través de nutrientes que estén presentes en cuantía insuficiente (normalmente, fertilizantes con nitrógeno y fósforo). Este método se denomina “bioestimulación”.

Pero si en la zona no existen tales microorganismos, pueden añadirse otros con propiedades específicas para degradar el contaminante. Hablamos entonces del método de “bioincremento”.

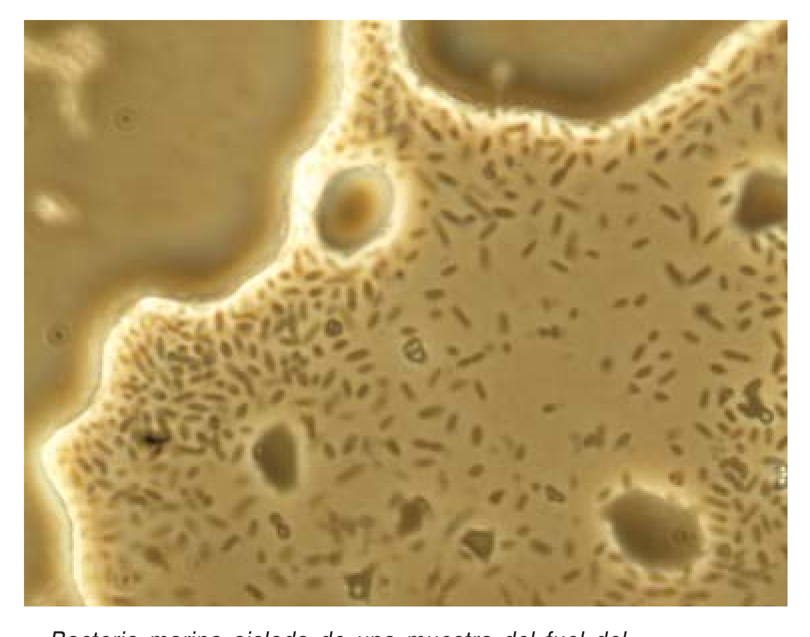
Ahora bien, cuando el contaminante no puede biodegradarse, como sucede con los metales pesados, se sigue la estrategia de la bioacumulación. Consiste en acumular el contaminante en el interior de plantas verdes o microorganismos, que posteriormente son retirados y depositados en un lugar específico.

En muchos casos, la biorremediación constituye una operación complementaria, que se acomete una vez limpiada en lo posible la contaminación por métodos físico-químicos o mecánicos. La efectividad de un proceso de biorremediación varía mucho según el caso. El tratamiento de zonas contaminadas por petróleo nos ofrece un buen ejemplo.

En casi todos los lugares suelen encontrarse microorganismos que degradan hidrocarburos (los principales componentes del petróleo), ya que estos compuestos también los encontramos en plantas y otros organismos. Muchos microorganismos pueden utilizarlos como alimento; pero el crecimiento de estos microorganismos suele estar limitado por la falta de fuentes adecuadas de nitrógeno y fósforo. En el accidente del petrolero *Exxon Valdez* en las costas de Alaska en 1989, tras la recogida mecánica del crudo se acudió a la biorremediación para eliminar la contaminación restante.

Se comprobó que al suministrar fertilizantes con nitrógeno y fósforo el número de microorganismos degradadores de hidrocarburos en las zonas contaminadas aumentaba de una forma significativa. Esto facilitó la degradación de muchos de los hidrocarburos presentes, aunque no de todos. La mayoría de tales microorganismos producían distintos tipos de detergentes naturales (biosurfactantes), que ayudan a solubilizar el petróleo.

En el caso del accidente del petrolero *Prestige*, la efectividad esperada para un tratamiento similar será



Bacteria marina aislada de una muestra del fuel del Prestige*, vista en un microscopio óptico, asimilando hidrocarburos de petróleo. Las bacterias se agrupan alrededor de las gotas del hidrocarburo (un alcano, en este caso), que son esencialmente insolubles en agua. Las bacterias crecen captando el hidrocarburo del entorno; lo oxidan para transformarlo en CO_2 y H_2O*

mucho menor. La razón estriba en el fuel vertido, una fracción del petróleo muy enriquecida en componentes que los microorganismos degradan mal o no degradan en absoluto.

Entre las causas que limitan la biodegradación de estos compuestos destacan el elevado peso molecular, muy baja solubilidad en agua y muy compleja estructura de muchos de ellos. Mientras que la biorremediación puede llegar a eliminar hasta un 80-90 % de un petróleo crudo, en el caso de un fuel pesado difícilmente se eliminará más de un 35 %.

No obstante, una estrategia de biorremediación puede ayudar a regenerar la zona, fundamentalmente acelerando procesos naturales, que terminarán ocurriendo en cualquier caso. ¿Qué sucede con los componentes no biodegradables? Muchos se irán transformando por oxidación química por efecto del oxígeno o de la luz solar. Otros se irán dispersando, adhiriéndose a superficies o se enterrarán. Ciertamente, se sabe poco de este tema.

Los microorganismos son útiles en muchos procesos de descontaminación. En las depuradoras biológicas de las ciudades, reducen la materia orgánica de aguas residuales en más de un 90 %. Existen depuradoras que funcionan con microorganismos especializados para tratar contaminantes específicos (por ejemplo, exceso de nitratos, explosivos, mercurio). Son muy eficaces para limpiar la contaminación de efluyentes de determinadas industrias.

FERNANDO ROJO DE CASTRO
Centro Nacional de Biotecnología, CSIC,
Madrid

Saccharomyces cerevisiae

Relación entre expresión génica y fenotipo

Desde que en el año 1996 se logró determinar la secuencia completa del genoma de un organismo eucariota, la levadura del pan *Saccharomyces cerevisiae*, el número de genomas cuya secuencia se va completando aumenta a un ritmo creciente. Con la enorme cantidad de datos que se van acumulando, los biólogos moleculares están preparados para comenzar una nueva etapa en la investigación genómica, en la que analizarán funcionalmente las secuencias y otros aspectos de interés. Uno de los organismos modelo para llevar a cabo estos estudios de genómica funcional es *S. cerevisiae*, debido en parte a la facilidad con la que este sencillo organismo eucariota unicelular puede ser cultivado y manipulado genéticamente.

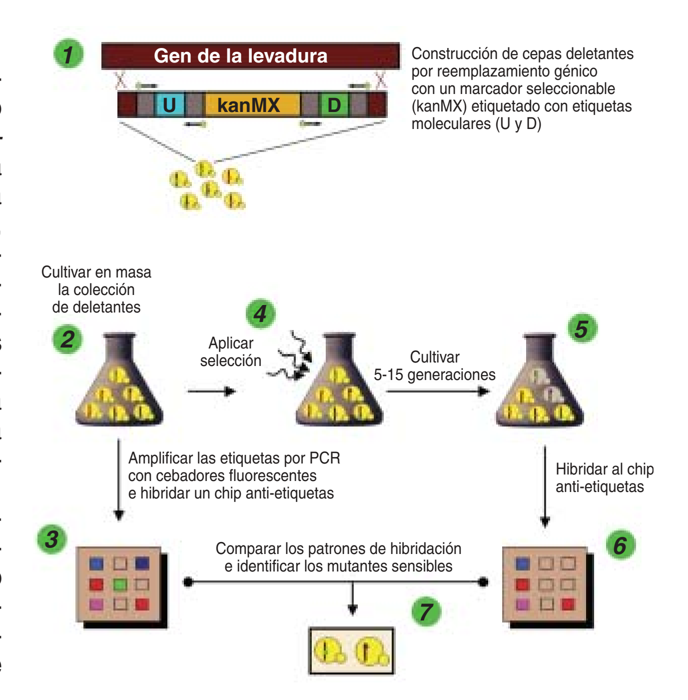
Tras varias décadas de experimentación, la levadura del pan se ha convertido en uno de los organismos mejor conocidos desde el punto de vista genético y bioquímico. No obstante, se estima que no se ha caracterizado todavía, es decir, no se ha logrado determinar ni las propiedades o la función, ni siquiera de la mitad de los genes identificados durante el proyecto de secuenciación de su genoma.

Los análisis bioinformáticos pueden venir en nuestro auxilio y arrojar luz sobre esa mitad en sombra. De hecho, esos análisis permiten inferir la función de una tercera parte adicional de los genes, basándose en su homología con genes de otros organismos cuyas funciones son conocidas. Pero se ignora por completo la función del tercio restante; para ser más exactos, de un 20 % de los genes identificados durante la secuenciación sistemática de su genoma.

Uno de los grandes retos con los que se enfrentan ahora los genetistas que estudian esta levadura estriba, por tanto, en determinar el papel que desarrollan en la célula tales genes "huérfanos" de función, así como generar datos experimentales sobre los genes cuyas funciones se han deducido a partir de análisis informáticos.

Los investigadores abordan el desafío a través de diversas estrategias experimentales; entre ellas, el análisis de la expresión génica, la deleción de genes, la localización de proteínas y la caracterización del proteoma. Algunos de estos experimentos implican la aplicación, a gran escala, de técnicas clásicas, mientras que otros dependen del conocimiento previo de los datos aportados por la secuenciación de su genoma.

Uno de los métodos más eficaces para determinar la función de un gen consiste en observar los efectos (fenotipo) que la ausencia de dicho gen produce en la célula. Se trata de la estrategia empleada durante muchos años para asignar funciones a genes. El proceso habitual consistía en lo siguiente: las células se sometían a mutaciones, se sembraban luego en placas de medio nutritivo a bajas densidades y se dejaba que se replicaran en condiciones restrictivas. Las células mutantes que no podían crecer en las condiciones de crecimiento restrictivo presentaban con frecuencia le-



siones en un gen que estaba implicado en el proceso celular en estudio.

Esa estrategia clásica adolecía de una importante limitación: nunca se estaba seguro de que el escrutinio de mutantes se había efectuado a saturación y no hubieran escapado al ensayo algunos genes implicados.

Pero ahora disponemos de la secuencia completa de *S. cerevisiae*. Cabe, pues, ensayar metodológicamente cada uno de sus genes en una condición determinada. Esta aproximación genómica global se funda en la capacidad de las moléculas lineales de ADN de integrarse, con gran eficacia, en lugares homólogos del cromosoma de la levadura. Se cuenta para ello con una técnica poderosa, la reacción en cadena de la polimerasa (RCP). Así, un producto RCP que contenga sólo 45 bases de homología en ambos extremos puede utilizarse para reemplazar un gen determinado cuando el producto de RCP porte un marcador seleccionable.

Un consorcio de ocho laboratorios norteamericanos y ocho europeos ha recurrido a esta estrategia para construir una colección de cepas mutantes (cepas a las que se ha eliminado, por deleción, un gen) para cada uno de los aproximadamente 6400 genes que contiene la levadura. Al mismo tiempo que se producía la deleción del gen, se introducía en la cepa mutante una pareja de etiquetas moleculares exclusivas de 20 pares de bases. De esta forma, cada cepa mutante es portadora de sus propias etiquetas de 20 pares de bases, que le sirven de identificador similar a un código de barras.

Las etiquetas permiten analizar en pleno el fenotipo de cada cepa de la colección completa de deletantes ante una determinada respuesta celular, una operación que antes era preciso abordar de forma individualizada. Como las cepas portadoras de las etiquetas moleculares exclusivas se distinguen de otras cepas de la población, se puede cuantificar la abundancia de cada tipo de mutante antes y después de la aplicación de cualquier condición restrictiva. (La concentración del mutante puede averiguarse incluso en momentos diferentes.) Merced, pues, al análisis de la abundancia de las distintas etiquetas, se establece la identidad de las cepas mutantes que son enriquecidas o eliminadas de la población al aplicar la condición restrictiva.

Para facilitar el análisis simultáneo de miles de etiquetas moleculares, se ha desarrollado un método basado en el uso de "chips" de ADN (micromatrices que contienen oligonucleótidos de secuencia específica), similares a los que se emplean en los análisis del transcriptoma.

Al estar las etiquetas moleculares, en las cepas mutantes por deleción, flanqueadas por secuencias de anillamiento comunes, podían multiplicarse mediante RCP; se utilizaban cebadores marcados por fluorescencia. A continuación, los amplicones (productos de la reacción de amplificación RCP) marcados por fluorescencia se hibridan con una micromatriz de ADN que contiene los oligonucleótidos complementarios a las etiquetas moleculares. Para detectar las intensidades de la hibridación de las etiquetas se emplea un escáner confocal modificado, muy sensible, que puede analizar miles de etiquetas en un único experimento de hibridación.

Con este método se han analizado cuantitativamente las respuestas fenotípicas que muestran cada uno de los más de 6000 mutantes de la levadura ante diferentes cambios en sus condiciones de cultivo. Entre las condiciones, nos referimos al uso de fuentes de carbono o de nitrógeno alternativas, condiciones que provocan estrés celular (térmico, osmótico, alcalino, etcétera) y la presencia de fármacos con actividad antifúngica.

La aplicación de esta técnica, que permite acelerar el análisis fenotípico del genoma, proporciona una enorme cantidad de información sobre la función de los genes en las diferentes respuestas celulares y sus interrelaciones. Los primeros resultados plantean un interrogante sobre la relación existente entre regulación génica y expresión fenotípica; cuestionan, además, la presunción de que los genes que muestran variaciones en su expresión génica en respuesta a la adaptación de la célula a nuevas condiciones fisiológicas ejercen una función importante en dicho mecanismo de adaptación.

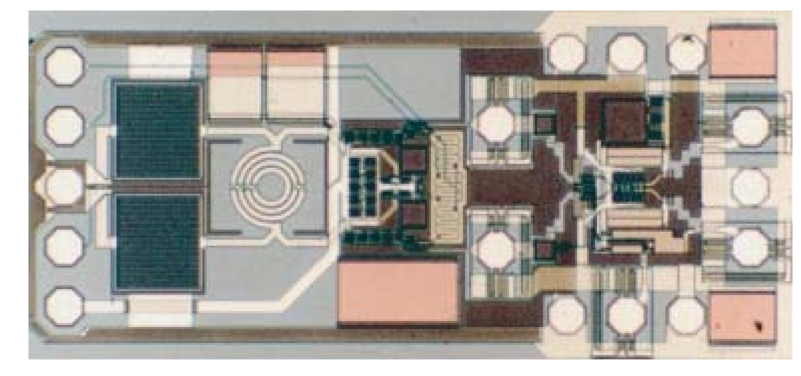
JOSÉ LUIS REVUELTA y ROCÍO BENITO
Departamento de Microbiología y Genética,
Instituto de Microbiología Bioquímica,
CSIC/Universidad de Salamanca

Frente al apagón analógico

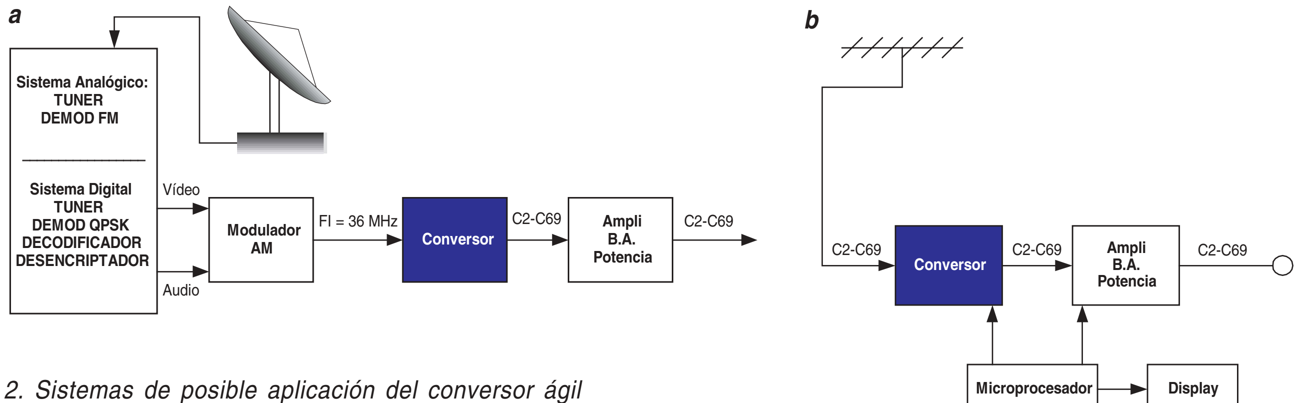
Convivencia de los sistemas analógico y digital

La aparición de las técnicas de codificación digital de imagen ha contribuido a una nueva revolución en el mundo de las comunicaciones. La posibilidad de codificar las imágenes en formato digital permite aplicarles las mismas técnicas de almacenamiento, procesamiento y transmisión que ya han demostrado su validez para otros tipos de datos, como puede ser la voz en el caso de la telefonía móvil.

Con la posibilidad de digitalizar una imagen aparecen varias aplicaciones interesantes. Si atendemos al número de usuarios que llegará a abarcar, la principal



1. Conversor frecuencial formado por un oscilador y un mezclador integrados



2. Sistemas de posible aplicación del conversor ágil

es la difusión de televisión digital terrestre. Entre las ventajas de la televisión digital frente a la analógica, mencionaremos: la mejora en la calidad de imagen y sonido, mayor aprovechamiento del espectro frecuencial, la televisión de pago, inclusión de subtítulos y reutilización de frecuencias.

Se mejora la calidad de imagen mediante la aplicación de códigos de detección de error, que permite evitar efectos que degradan la nitidez de la señal (ruido, interferencias, doble imagen y otros). Por lo que atañe al sonido, alcanza la calidad del disco compacto. Se le saca mayor partido al espectro frecuencial, al admitir técnicas de compresión de vídeo (espaciales y temporales) combinadas con métodos de modulación de alta eficacia. Esto permite la inclusión de un mayor número de canales en un determinado ancho de banda. Debido a la facilidad de encriptado y acceso condicional se abre paso a la televisión de pago. No sólo admite la inclusión de subtítulos y demás información relacionada con la programación, sino que puede también seleccionar la señal de audio en otros idiomas.

Aunque la televisión digital no está exenta de inconvenientes (entraña mayor complejidad y coste), las grandes ventajas que conlleva hacen fácil adivinar la razón por la que a lo largo de los próximos años se irá produciendo la sustitución gradual de los sistemas analógicos por los digitales.

Recientemente, el gobierno español ha adelantado el denominado apagón analógico desde finales de 2011 hasta, como muy tarde, finales de 2009. Se denomina apagón analógico al fin de las emisiones analógicas de televisión y su sustitución total por las emisiones digitales. Ahora bien, puesto que durante cierto tiempo coexistirán los dos sistemas, importa que los equipos de antena que se diseñen sean compatibles con ambos formatos.

La convivencia de ambos sistemas requiere introducir los nuevos canales digitales sin haberse liberado aún las frecuencias ocupadas por los analógicos. Esa situación supone una mayor concentración de señales en el espectro radioeléctrico.

Tal concentración incrementa la necesidad de selectividad que requieren los nuevos sistemas de recepción. El principal problema, para los usuarios, consiste en poder recibir las nuevas señales digitales sin tener que instalar una nueva antena. En este contexto, y como solución al problema presentado, en TECNUN y en colaboración con la empresa IKUSI-Angel Iglesias S. A. se ha desarrollado un conversor ágil para la banda de televisión que, presentando esa mayor selectividad, cumple las características requeridas para la recepción de señales.

El conversor ágil desarrollado permite su inclusión tanto en sistemas de MATV (televisión por antena colectiva) como de CATV (por cable) y satélite (*figura 1*). Las tecnologías de integración de circuitos presentan varias ventajas frente a la realización tradicional del sistema mediante componentes discretos. Por citar algunas: reducción de volumen y peso de los componentes, menor coste en la fabricación de grandes series, aumento de la fiabilidad merced al menor número de conexiones externas y mayor protección frente a copias.

Por estas razones se ha integrado en un chip el mayor número posible de componentes del conversor que han permitido las características de la tecnología estándar de bajo coste utilizada. Se trata de SiGe 0,8 µm, de la fundidora austríaca *Austriamicrosystems*. Pese a que la longitud de canal de los transistores es elevada en comparación con la de otras técnicas de integración de circuitos utilizadas en la actualidad, se pueden integrar diseños que funcionan correctamente hasta frecuencias cercanas a los 2,7 gigahertz, frecuencia superior a la requerida.

En la figura 1 se puede observar uno de los principales circuitos integrados diseñados. Se utiliza en el conversor ágil para realizar una traslación frecuencial que permita tratar la señal a bajas frecuencias y, así, abordar con una mayor selectividad su filtrado. Otra traslación frecuencial similar se aplica luego para situar el canal deseado a la frecuencia requerida por el usuario. Con la obtención de este conversor ágil se ha dado un paso más hacia la posibilidad de que, ahorrándose la actualización de la instalación de antena, los usuarios reciban en sus hogares la nueva televisión digital.

ERIK HERNÁNDEZ, ROC BERENGUER
ANDRÉS GARCÍA ALONSO
Depto. de Electrónica y Comunicaciones
Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián
Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra
(Tecnun)

Piedra ornamental

Restauración bacteriana

El deterioro de los monumentos que han soportado "el paso de los siglos", se ha acentuado en los últimos tiempos debido al incremento de la contaminación ambiental y la lluvia ácida, sobre todo en las urbes, donde suelen concentrarse esas nobles construcciones, auténticos recursos no renovables.

El deterioro es más insidioso si se trata de piedra de naturaleza calcárea: calizas, areniscas, travertinos y mármoles, constituidos en todo o en parte por carbonato cálcico, ya que la calcita ($CaCO_3$), el mineral mayoritario, se muestra muy inestable en medios ácidos.

Desde hace varios decenios se ha intentado poner remedio con materiales protectores y consolidantes, que frenen la progresiva degradación de la piedra. Se han utilizado resinas de tipo epoxi o acrílicas; también, diversos polímeros orgánicos. Pero se han cosechado resultados muy pobres, cuando no perjudiciales, al provocar una aceleración de la alteración.

En su empeño por recurrir a materiales más concordantes, en su naturaleza y propiedades, con el material calizo original, la ciencia ha dirigido su mirada hacia los biomateriales. Así se llaman los minerales, generalmente carbonatos, producidos por los seres vivos, a menudo microorganismos. Se han utilizado, en particular, bacterias del genero *Bacillus*, aunque con resultados bastante modestos. El espesor de la capa regenerada alcanza sólo unas milésimas de milímetro. Además, estas bacterias distan de ser inocuas; generan esporas muy resistentes que contaminan la piedra y terminan por torpedear la microbiota natural.

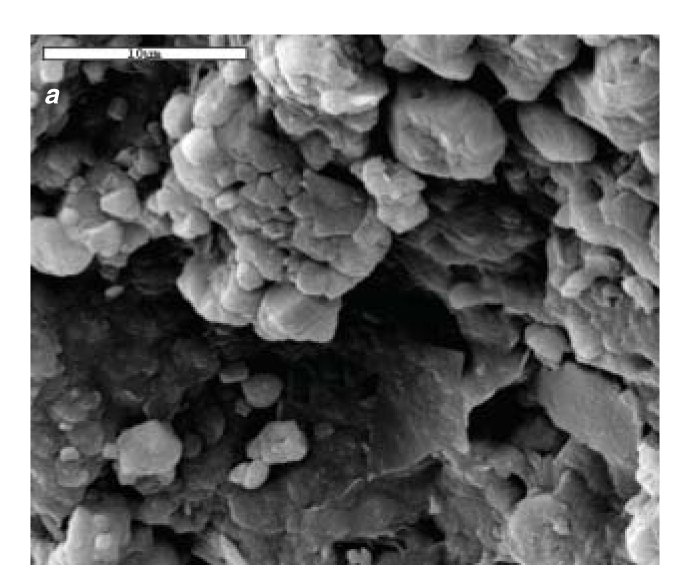
Nuestro grupo de trabajo de la Universidad de Granada lleva más de doce años estudiando la capacidad biomineralizadora de *Myxococcus xanthus*. Esta bacteria del suelo, inofensiva, produce antibióticos y desempeña una función muy activa en la degradación de la materia orgánica del suelo. Tiene una cierta movilidad por deslizamiento y, en determinadas condiciones, sufre un proceso de autólisis en ausencia de nutrientes, sin dejar esporas contaminantes.

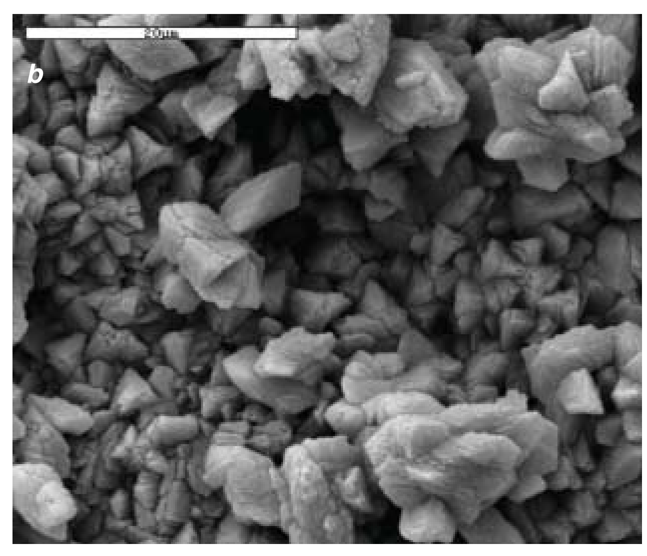
En condiciones adecuadas de medio de cultivo el mixococo produce calcita con un tamaño de cristal similar al del cemento calizo de la biocalcarenita (*véase la figura*), piedra con la que están construidos la mayoría de los monumentos emblemáticos de Granada (Alhambra, Catedral, Capilla Real, Palacio de Carlos V, Chancillería, Monasterio de San Jerónimo, Hospital Real y otros). Se trata de una roca común de la mayoría de los países de la cuenca mediterránea.

Gracias a la movilidad de estas bacterias, el cemento neoformado penetra en las cavidades de la piedra alterada y la reconstruye en profundidad, con un material físicamente muy similar al original. Por ser en parte orgánico (en realidad se trata de un verdadero compuesto o "composite") es más duro y resistente al ataque químico que el cemento original. Esa propiedad garantiza una durabilidad de la superficie restaurada, superior a la del material originario. La porosidad y otras características esenciales de la piedra natural se mantienen, aunque el espesor del nuevo material cementante es de centenares de micras.

Nuestros resultados corresponden todavía a la escala de laboratorio. Deberán superar el desafío que supone el operar en condiciones reales *in situ*. No obstante, los primeros ensayos en condiciones semirreales son muy alentadores, lo que augura un futuro prometedor para el empleo de esta novedosa técnica en la conservación y restauración de nuestro rico patrimonio histórico-monumental.

MANUEL RODRÍGUEZ GALLEGO,
CARLOS RODRÍGUEZ NAVARRO
Depto. de Mineralogía y Petrología,
Universidad de Granada
M.ª TERESA GONZÁLEZ MUÑOZ
Depto. de Microbiología, Universidad de Granada





Fotografías de microscopía electrónica de barrido de una calcarenita antes (a) *y después* (b) *del tratamiento de biomineralización con* M. xanthus

Catálogo de auroras boreales

Observadas desde la península Ibérica durante el período 1700-1855

Generalmente, los científicos recogen datos gracias a diferentes aparatos ubicados en laboratorios o campañas de medidas de campo. Sin embargo, los documentos históricos que nos proporcionan información sobre fenómenos geofísicos o astronómicos que ocurrieron en tiempos remotos deben considerarse como herramientas para los científicos dedicados a estos estudios. Eso sí, estos datos aparecidos en fuentes históricas son difíciles de encontrar y deben ser interpretados con precaución. Entre los fenómenos susceptibles de haber quedado registrados en documentos históricos hay terremotos, cometas, supernovas, eclipses, bólidos, manchas solares y, también, las auroras.

Las auroras son uno de los fenómenos más bellos que pueden observarse. Desde un punto de vista científico, se trata de fenómenos complejos, de estudio muy interesante. A grandes rasgos, se producen debido a la interacción de partículas provenientes del Sol con las capas más altas de la atmósfera terrestre. Son habituales en las latitudes terrestres cercanas a los polos. En latitudes medias y bajas resultan bastante más raras; se producen sólo cuando hay grandes "tormentas" en el Sol y el flujo de partículas emitidas por nuestra estrella es muy intenso. Entonces, la aurora puede verse en lugares como la península Ibérica, donde es raro que se manifieste. En estas latitudes más bajas suelen aparecer con un color rojizo, difusas y sin apenas movimiento.

Los catálogos de auroras observadas en determinados lugares son unas herramientas muy interesantes para los estudiosos de la relación entre el Sol y la Tierra. El físico francés Mairan publicó el primer catálogo en 1733 (y una segunda edición en 1754), incluido en una notable obra sobre auroras. Durante el siglo XVIII le siguieron Kirch (1735) y Frobesius (1739). En el siglo XIX, Fritz (1873) compiló un magnífico catálogo que aún hoy se sigue consultando, y Boller (1898) publicó una extensa lista de auroras observadas desde el hemisferio sur. Ya en el siglo XX, podemos señalar especialmente los catálogos de auroras realizados por Link (1962 y 1964). Gracias a estas colecciones de registros de observaciones aurorales es posible que hoy en día podamos estudiar las variaciones de la actividad solar y auroral durante los siglos pasados.

Nos gustaría presentar someramente un antiguo catálogo de auroras boreales observadas desde la península Ibérica, publicado en las *Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* por el físico español Manuel Rico Sinobas en 1855. Este es, sin duda, uno de los trabajos más interesantes realizados por los físicos españoles del siglo XIX. Los registros de Rico Sinobas cubren un período que va desde 1700 hasta 1855, incluyendo la observación de 40 auroras diferentes. Hay que destacar que Rico Sinobas actuó tan sólo como compilador de los datos que presenta, ya que en ningún lugar figura como observador de algún fenómeno auroral. En su trabajo, Rico Sinobas nos proporciona datos suplementarios relacionados con las observaciones e intenta un estudio estadístico rudimentario para relacionar la aparición de las auroras con diferentes situaciones atmosféricas. El catálogo de Rico Sinobas tiene un valor añadido, ya que todas las auroras fueron observadas desde lugares de latitud baja donde no es cotidiana la aparición de estos fenómenos.

Hay constancia de la observación de auroras boreales en la península Ibérica desde muy antiguo. En una crónica romana podemos encontrar la aparición de una aurora en el año 45 a.C., por ejemplo. También conocemos la observación de una aurora el 3 de abril del 451, noticia que fue recogida por el obispo Idacio y, posteriormente, por San Isidoro de Sevilla. No hace mucho presentamos ante la comunidad científica internacional pruebas de la observación de dos auroras en los años 880 y 942, desde Fez (norte de Africa) y Córdoba respectivamente, a partir de documentación árabe de la época. Gracias a las fuentes documentales cristianas, sabemos que aparecieron auroras los años 827, 1536 y 1551.

Manuel Rico Sinobas nació en Valladolid en 1821. Fue doctor en medicina y en física, catedrático de física en la Universidad Central de Madrid y Vicepresidente de la Academia de Ciencias de Madrid. Fue uno de los físicos españoles más importantes del siglo XIX. Publicó diversas memorias sobre aspectos meteorológicos y un libro de texto que alcanzó numerosas ediciones. Rico Sinobas también es conocido por su edición de los "Libros del Saber de Astronomía" del rey de Castilla Alfonso X "el Sabio". Murió en Madrid en 1898.

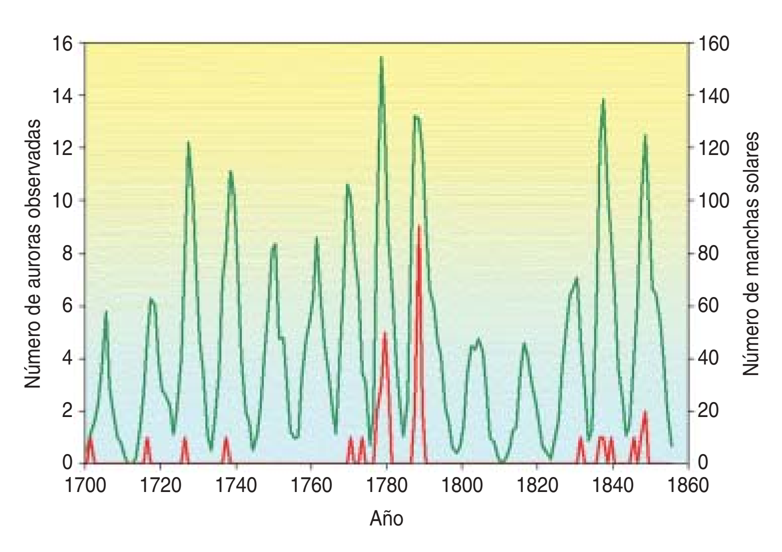
El catálogo de Rico Sinobas puede considerarse como uno de los trabajos pioneros de la física terrestre-solar en España. Otro trabajo español pionero en este campo fue el que escribió Máximo Fuertes Acevedo en 1876 sobre la observación de una aurora boreal dos noches seguidas desde Santander. Debemos tener en cuenta que el servicio meteorológico español comenzó a organizarse durante la segunda mitad del siglo XIX y que el observatorio geofísico y astronómico del Ebro inició sus estudios durante los primeros años del siglo XX.

El trabajo de Rico Sinobas recoge 40 auroras. De forma general, la información que nos proporciona está referida a la fecha de observación, el lugar de observación, la dirección de la bóveda celeste por donde se observó la aurora y su color. Estas características nos proporcionan una información preciosa para establecer la fiabilidad del catálogo.

En esa lista de las auroras observadas, lo primero que llama la atención es su notable escasez en los primeros años de los siglos XVIII y XIX. El propio Rico Sinobas nos dice: "*Por la enumeración anterior de las auroras boreales observadas en España, se demuestra la periodicidad secular con la cual fueron vistos aquellos meteoros de una manera semejante a la indicada por los observadores en otros puntos del norte de Europa y América, apareciendo las auroras rara*

vez desde 1700 a 1720, reproduciéndose con frecuencia hasta 1790 para desaparecer casi completamente en el último por un período de 30 años, pasados los cuales han vuelto a presentarse diferentes luces boreales en el horizonte de los observadores del antiguo y nuevo continente". Estos dos períodos de práctica ausencia de observaciones de auroras corresponden al final del Mínimo de Maunder y al Mínimo de Dalton, dos episodios de la historia reciente del Sol en los cuales se registró una actividad solar muy baja.

Antes de entrar con detalle en los datos ofrecidos por Rico Sinobas, podemos decir que hay una confirmación por otra fuente de uno de los más antiguos registros del catálogo: una aurora observada desde Córdoba el 18 de enero de 1770. Nosotros hemos encontrado la descripción de una aurora observada el mismo día desde Badajoz. Se encuentra en un manuscrito custodiado en el archivo de la Catedral de Badajoz que tiene por título "Libro de Noticias sacadas por Don Leonardo Hernández Tolosa, presbítero, vecino de esta ciudad de Badajoz".



Evolución respecto al tiempo del número de auroras observadas desde la península Ibérica según el catálogo de Rico Sinobas (línea roja) *y del número de manchas solares* (línea verde)*. Podemos apreciar en la figura cómo cada once años aproximadamente se produce un máximo en el número de manchas solares*

La mayoría de los registros no dan el nombre del observador. Rico Sinobas tan sólo cita a siete observadores a lo largo de todo el catálogo: Tosca, Feijoo, Nifo, Larrea, Salvá, Montojo y Arrau Barba. Vemos que entre ellos hay desde divulgadores de la ciencia de la época de la Ilustración como Feijoo hasta científicos como Salvá o Tosca. Rico Sinobas indica que algunas de las observaciones se recogieron en el periódico *Gaceta de Madrid*.

También hay una diversidad considerable de lugares desde donde fueron observadas las auroras; cubren la mayor parte de la península Ibérica. Muchas de las observaciones (62 % del total) se hicieron en ciudades pobladas como Madrid y Barcelona. Si quisiésemos extender la serie temporal de observaciones aurorales, deberíamos tener en cuenta que el alumbrado con gas o eléctrico de las calles se introdujo en las grandes ciudades durante la segunda mitad del siglo XIX; deberíamos esperar menos observaciones en esa época, ya que el alumbrado dificultaría la observación de auroras.

Hemos intentado analizar la fiabilidad de los datos registrados por Rico Sinobas respecto al color de las auroras, su azimut, visibilidad de acuerdo con el calendario lunar y relación con la actividad solar. Respecto al color de las auroras, en el catálogo predominan los colores rojo y blanco, lo cual está dentro de lo esperado para estas latitudes. De todas formas, debemos indicar que el color es uno de los parámetros que peor recogió Rico Sinobas. De hecho, no hay información sobre el color de la aurora en el 60 % de los casos que recopila.

Por otro lado, distinguiendo 16 puntos cardinales, Rico Sinobas nos ofrece datos del azimut de 23 auroras (57,5 % del total). Estas medidas se realizaban a simple vista. Además, las auroras cubren a menudo un amplio sector del cielo; por ello, la medida del azimut es sólo aproximada. La mayoría de las auroras aparecen en la dirección norte, principalmente entre el norte y el noroeste, lo cual concuerda con la posición del polo magnético terrestre para aquellos tiempos.

También hemos analizado la relación entre la luz de la luna y la frecuencia de observaciones de auroras. Podemos suponer que cuando tenemos luna nueva observar una aurora boreal deberá de ser muy fácil. En cambio, si una aurora aparece cuando hay luna llena será muy posible que los observadores no se den cuentan de ella debido a la gran cantidad de luz existente en el cielo. Por lo tanto, hemos calculado la fase de la luna en cada fecha de observación proporcionada por Rico Sinobas para ver si se cumplía lo que suponíamos. Efectivamente, así es a grandes rasgos, aunque con un pequeño desfase de dos o tres días, probablemente debido a que la muestra estadística es pequeña.

También queríamos comparar la serie de observaciones aurorales con la actividad solar. La figura nos muestra la evolución del número anual de auroras registradas por Rico Sinobas y el número de manchas solares. De una forma cualitativa, podemos apreciar que las auroras aparecen aproximadamente en los años de máxima actividad solar, cuando el número de manchas solares es máximo. Aún más interesante es la ausencia de observaciones de auroras desde la península Ibérica durante el llamado Mínimo de Dalton, el primer tercio del siglo XIX, donde se aprecia una baja actividad solar.

J. M. VAQUERO
M. C. GALLEGO
J. A. GARCÍA
Departamento de Física
Universidad de Extremadura

DE CERCA

Texto y fotos: Sergio Rossi

Proteínas de estrés térmico y algo más



1. *Los estudios sobre el papel ecológico de las proteínas de estrés o de choque térmico se han centrado en el efecto que los cambios intermareales producen en los organismos sésiles: bruscos cambios de temperatura, desecación, rayos UV,* pH *y salinidad (al quedar expuestos en marea baja al efecto de las lluvias)*

Las llamadas proteínas de estrés se descubrieron por azar (como gran parte de los hallazgos científicos) a finales de los años sesenta. Se las considera conservadoras, en el sentido de que su estructura se ha mantenido poco alterada a lo largo del tiempo. Aumentan la supervivencia celular por una doble vía: evitan el desdoblamiento de las estructuras tridimensionales de las enzimas y reducen la acumulación de polipéptidos dañados o anormales.

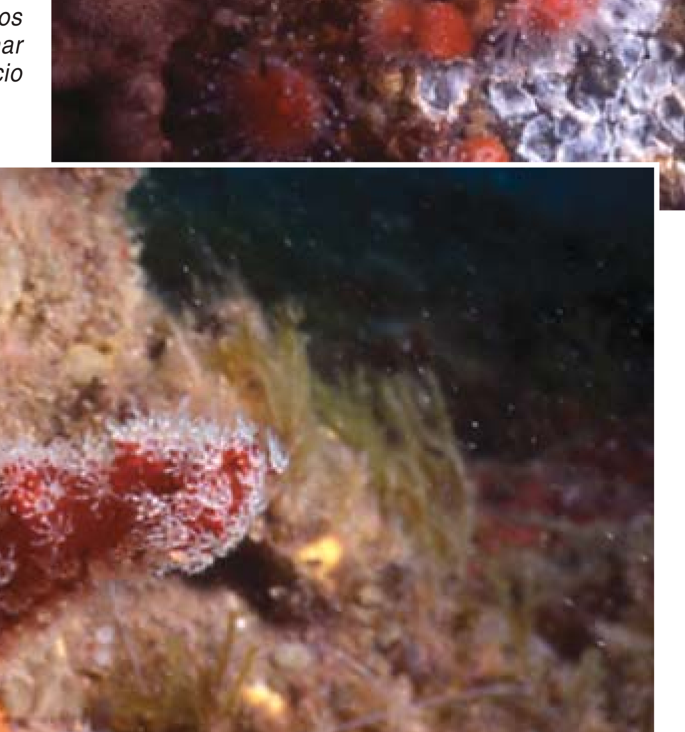
Se desconoce si los organismos expresan tales proteínas de estrés, o de choque térmico como también se las llama, de una forma ocasional o lo hacen de una manera rutinaria. Tampoco se ha avanzado mucho en el conocimiento de los mecanismos subyacentes bajo dicha expresión. Se las ha venido vinculando con los cambios bruscos de temperatura, pues en esas circunstancias se activan para evitar los efectos desnaturalizadores del choque térmico.

A los ecólogos les ha interesado, en particular, la expresión de las proteínas de estrés en organismos intermareales, por la sencilla razón de que éstos sufren fuertes cambios de temperatura en el curso del día. Pero en los últimos años la función de estas chaperonas, grupo al que pertenecen tales proteínas, ha cobrado una nueva perspectiva ecológica. Se ha comprobado que se activan cuando compiten, por un espacio, organismos bentónicos sésiles. En estas condiciones, se desencadena una auténtica guerra química; las proteínas de estrés podrían ayudar a paliar los efectos negativos de las substancias agresoras del competidor que tienen al lado.

Hay algo más sorprendente. Se sospecha de la intervención de las proteínas de estrés en los cíclicos procesos de inanición de los suspensívoros bentónicos. En el Mediterráneo, la época estival y otoñal puede ser un período de escasez, con su repercusión consiguiente en la concentración de reservas, que se van consumiendo. Las proteínas de estrés manifiestan entonces máxima expresión, aunque su función quizá no sea evitar un “estrés” por falta de comida. Antes bien, podrían cumplir una misión reguladora de enzimas y otras proteínas implicadas en los cambios metabólicos sufridos por las células en ciclos anuales en el que la entrada de energía es irregular. Queda mucho camino por recorrer para entender los mecanismos de acción y la función que desempeñan estas proteínas, pero lo que está claro es que son más que proteínas de estrés térmico.

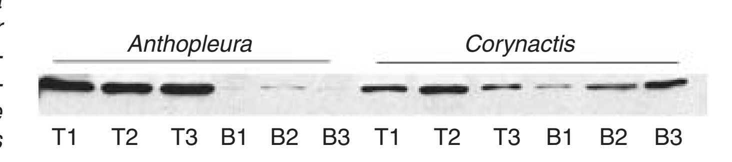


2. El antozoo Anthopleura elegantísima *sufre unas condiciones intermareales muy duras. Las proteínas de estrés le ayudan a aliviar la intensa radiación, las elevadas temperaturas y la desecación. En esa misma finalidad cooperan la formación de manchas muy densas, la retracción los pólipos, el recubrimiento de arena y la segregación de una sustancia mucosa humectante*



3. Las proteínas de estrés intervienen en los procesos de competencia por el espacio de los cnidarios bentónicos como Corynactis californica. *Quizá sirvan para contrarrestar los efectos nocivos de las substancias químicas utilizadas por los organismos sésiles para ganar o mantener su espacio*

4. Algunos trabajos de laboratorio relacionan la expresión de determinadas proteínas de estrés con procesos de inanición. De acuerdo con una investigación de campo los suspensívoros bentónicos mediterráneos (sometidos a un proceso de carencia de alimento recurrente en verano y en otoño) podrían utilizar estas proteínas para superar períodos de inanición en condiciones naturales



5. Al analizar la expresión de las proteínas de estrés en procesos de competencia por el espacio en tentáculos (T) y columna (B), las dos especies de antozoos Anthopleura elegantísima *y* Corynactis californica *siguen estrategias diferentes: la primera sólo la expresa en los tentáculos, mientras que la segunda la tiene repartida por todo el pólipo por igual. No sólo difiere en consecuencia la inversión energética, sino también la estrategia de colonización del espacio:* Anthopleura elegantísima *forma agregaciones, mientras que* Corynactis californica *se enfrenta en solitario a sus competidores*

Topoisomerasas de ADN de tipo II

Mediante cortes momentáneos en las cadenas del ADN las topoisomerasas de tipo II modulan la torsión de la molécula y eliminan los anudamientos que se generan en la doble hélice durante los procesos de actividad genética

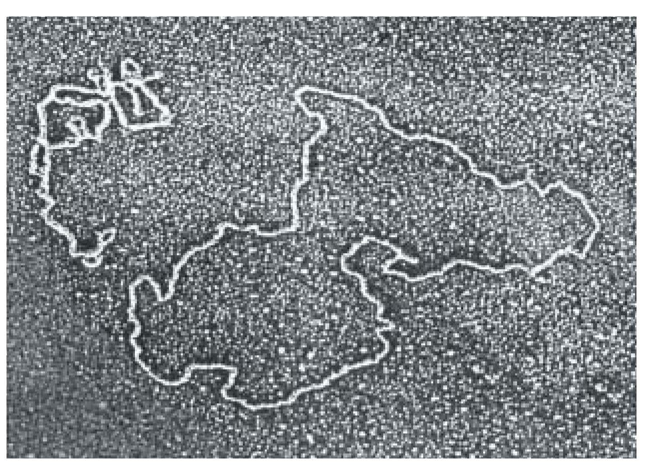
Joaquim Roca

Cuando en los años cincuenta se descubrió la estructura del ADN, el soporte de la información genética pasó a ser un objeto tangible. La complementariedad entre las bases nucleotídicas de las cadenas que forman la doble hélice de ADN y la elucidación del código genético escrito en la secuencia de dichas bases establecieron los fundamentos de la biología moderna.

Desde entonces, se ha trabajado sin descanso en los mecanismos moleculares implicados en la replicación, transcripción, recombinación y reparación del ADN. Queda por averiguar la modulación de esos procesos y su integración con otras funciones de la vida celular. En este ámbito, uno de los aspectos de mayor repercusión biológica lo ofrece la estructura del ADN: su organización espacial y su topología.

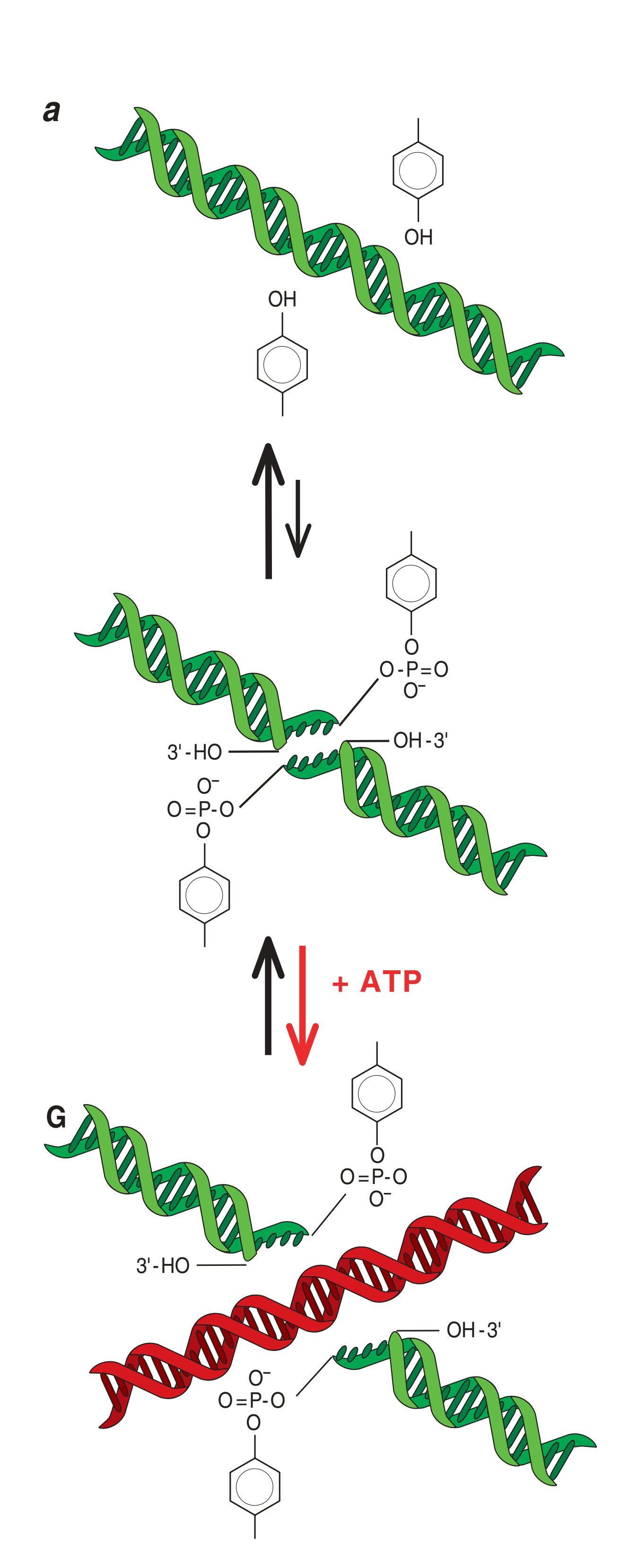
La doble hélice de ADN tiene un diámetro de 2 nanómetros (dos milmillonésimas partes de un metro), pero su longitud puede abarcar varios centímetros si se trata de una molécula con millones de bases nucleotídicas. Tal disparidad entre diámetro y longitud del ADN nos adelanta ya cuán condensado se halla en el interior celular, donde forma los cromosomas. En cada cromosoma, la longitud del ADN se comprime diez mil veces, lo que equivale a recoger en nuestro puño un finísimo hilo de un kilómetro de largo.

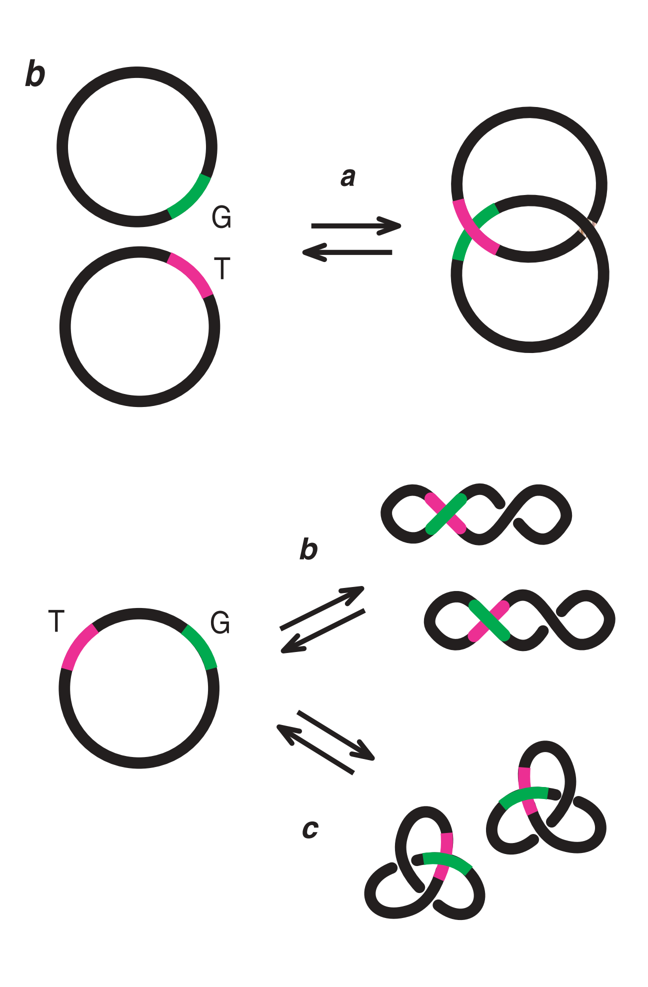
La condensación del ADN está determinada mediante precisos mecanismos moleculares. La doble hélice se retuerce sobre sí misma una y otra vez dibujando hélices y tejiendo fibras cada vez más complejas. De un modo paralelo se agrupan, entre sí, segmentos de ADN dis-



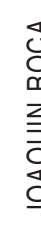
1. LA EXISTENCIA DE MOLECULAS DE ADN circulares se conoce por microscopía electrónica desde los años sesenta. Curiosamente, se observa que muchas de esas moléculas se encuentran retorcidas sobre sí mismas (*izquierda*). Adoptaban una estructura similar a la de un tubo de goma cuando, antes de unir sus extremos, hacemos girar varias veces uno de ellos. Hoy sabemos que este exceso de torsión o superenrollamiento ocurre en todas las moléculas de ADN en el interior de las células. Ello es debido a que el número de enlace entre ambas cadenas de la doble hélice presenta en promedio un déficit del 5 %. Las topoisomerasas son capaces de eliminar esa torsión mediante cortes momentáneos en segmentos del ADN, entre los cuales provocan el paso de otros segmentos. La repetición de este proceso permite recuperar el valor normal del número de enlaces y el ADN queda más relajado (*derecha*).

JOAQUIN ROCA





2. LAS TOPOISOMERASAS DE TIPO II son enzimas homodiméricas. Transportan una doble hélice de ADN, o segmento T (*en rojo*), a través de un corte transitorio en otra doble hélice de ADN, o segmento G (*en verde*). Para cortar ambas cadenas del ADN, la topoisomerasa ataca dos enlaces internucleiotídicos separados por cuatro pares de bases (*A*). La escisión consiste en una transesterificación reversible; en el curso de la misma se forma un intermediario covalente entre el fosfato del extremo 5′ del ADN y un aminoácido tirosina en cada mitad de la enzima. En presencia de ATP, la topoisomerasa transporta otro segmento de ADN a través del segmento escindido. Si el segmento G y el segmento T residen en moléculas de ADN distintas, la topoisomerasa encadenará o desencadenará dichas moléculas de ADN (*B*, *a*). Si ambos segmentos se hallan en la misma molécula de ADN, la topoisomerasa producirá cambios en el grado de superenrollamiento (*b*) o de anudamiento (*c*) de dicha molécula.

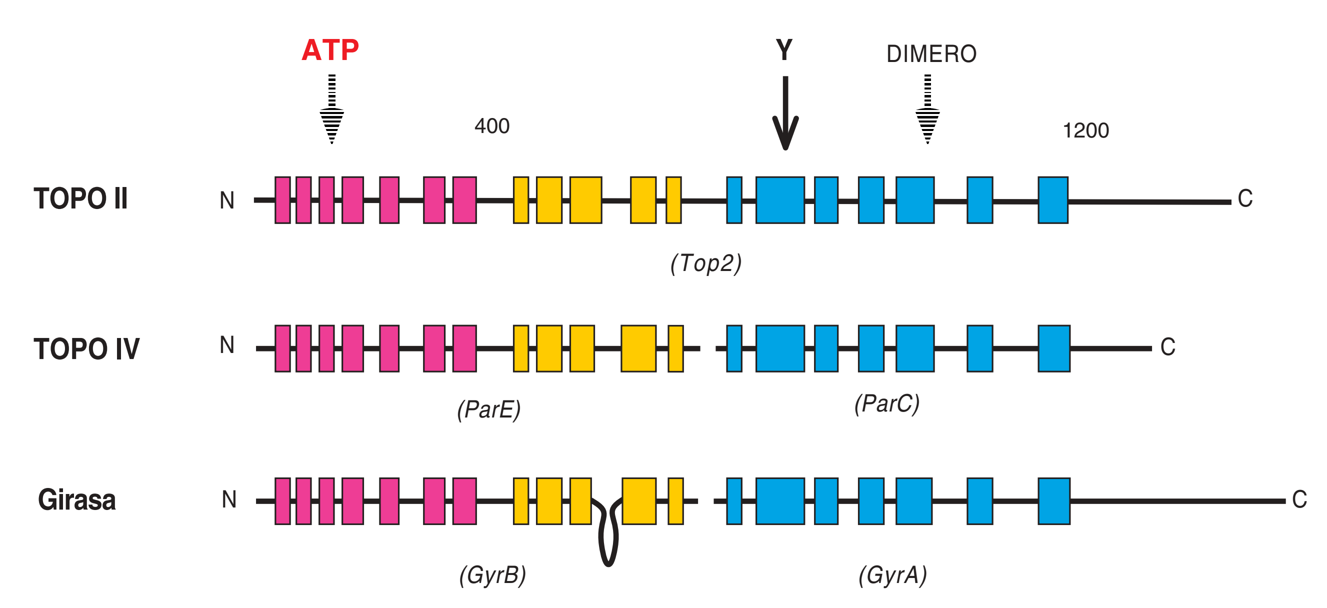


tantes varios miles de pares de bases para formar grandes asas o lazos.

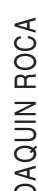
Zarcillos

Además de mantenerse unidas por el apareamiento de las bases nucleotídicas, las dos cadenas de la doble hélice de ADN se enroscan en zarcillos muy cerrados. Cada cadena gira en sentido dextrógiro alrededor de la otra con un paso de hélice cercano a 3,4 nanómetros, lo que implica 10,5 pares de bases en cada giro aproximadamente. El grado de enzarcillamiento se expresa mediante el número de enlace, un parámetro topológico cuyo valor aumenta una unidad cada vez que una cadena completa un giro alrededor de la otra. Así, por cada mil pares de bases el número de enlace entre las cadenas del ADN adquiere un valor cercano a cien.

La enorme longitud del ADN, junto al intenso enroscamiento de las cadenas de la doble hélice, ge-



3. CARACTER UBICUO DE LAS TOPOISOMERASAS de tipo II. Las encontramos en células eucariotas, procariotas y en numerosos virus. Cada mitad de la enzima consta de una o más subunidades, codificadas por genes independientes. En los eucariotas, las topoisomerasas de tipo II, o TOPO II, forman dímeros de una proteína de 170 kilodalton (unos 1400 aminoácidos) codificada por el gen *Top*2. En bacterias, las topoisomerasas de tipo II constituyen tetrámeros, integrados por dos pares de subunidades proteicas. Por ejemplo, en *E. coli* la TOPO IV es codificada por los genes *ParE* y *ParC*, y la girasa por los genes *GyrB* y *GyrA*. La estrecha homología en su secuencia de aminoácidos (*zonas rectangulares*) nos revela que todas las topoisomerasas de tipo II guardan parentesco evolutivo y poseen estructuras muy similares. El dominio responsable de la unión e hidrólisis del ATP (*en rojo*) ocupa la región amino terminal (N) de la enzima, mientras que el dominio principal de dimerización se halla cerca de la región carboxiterminal (*C*). En la figura se indica la posición de la tirosina (Y) involucrada en el corte y sellado del ADN.



nera constantes problemas topológicos dentro del minúsculo espacio celular. Así, durante su replicación, las dos cadenas de ADN de cada cromosoma deben desenlazarse del todo, para condensarse de nuevo en cromosomas independientes; lo que requiere reducir a cero el número de enlace entre las cadenas de ADN en el cromosoma original. De no ser así, al terminar la replicación, las nuevas moléculas de ADN persistirían enzarcilladas o encadenadas entre sí.

Superenrollamiento

En los años sesenta se produjo un descubrimiento sorprendente en la topología del ADN. Se hallaron moléculas de ADN circulares. Retorcidas sobre sí mismas de una manera singular, recuerdan la figura de un tubo de goma cuando, al unir sus extremos, hacemos girar varias veces uno de ellos. En el caso del ADN, este superenrollamiento es consecuencia de la torsión generada por un exceso, o por un defecto, del valor del número de enlace entre ambas cadenas de la doble hélice.

Sabemos hoy que la torsión constituye un fenómeno ubicuo en el ADN intracelular, que presenta en promedio un déficit del 5 % en el valor de su número de enlace. En moléculas de ADN circulares, esta torsión no puede disiparse mientras no se produzcan cortes en las cadenas que permitan a sus extremos rotar libremente. En moléculas lineales de ADN de gran longitud, la torsión queda confinada a dominios discretos entre las estructuras que las mantienen condensadas. Los cambios de torsión y superenrollamiento generados en la doble hélice determinan la conformación local del ADN a lo largo del cromosoma; influyen de un modo notable en la transcripción y recombinación del genoma.

La célula debe disponer de mecanismos para eliminar los encadenamientos y anudamientos generados en el ADN, así como para modificar el número de enlace de la doble hélice y modular, por ende, su grado de torsión y superenrollamiento. Tales mecanismos tendrían que operar cortando las cadenas del ADN para que las atravesaran otras cadenas, con la consiguiente restauración de la continuidad de las cadenas escindidas.

Topoisomerasas

Si bien se esperaba que en ese delicado proceso modificador participaran varias actividades enzimáticas, en el transcurso de los años setenta se descubrió que las hoy denominadas topoisomerasas se bastaban para alterar la topología del ADN (*véase* “Topoisomerasas de ADN”, por James C. Wang, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre 1982).

Dos rasgos distintivos caracterizan a esas enzimas. En primer lugar, pueden cortar y empalmar repetidamente los enlaces fosfodiéster que unen los nucleótidos constituyentes de las cadenas de ADN. En segundo lugar, permiten que otras cadenas de ADN pasen entre los dos cabos momentáneamente escindidos. Para evitar que los cabos del ADN

escindido vayan a la deriva, las topoisomerasas los sujetan con firmeza, mientras otras cadenas de ADN los atraviesan. En el desempeño de esa tarea, las topoisomerasas utilizan la energía del enlace internucleotídico escindido para unirse covalentemente al cabo 3' o 5' del ADN. Cuando empalman nuevamente el ADN, revierte esa unión covalente: restablecen el enlace internucleotídico inicial.

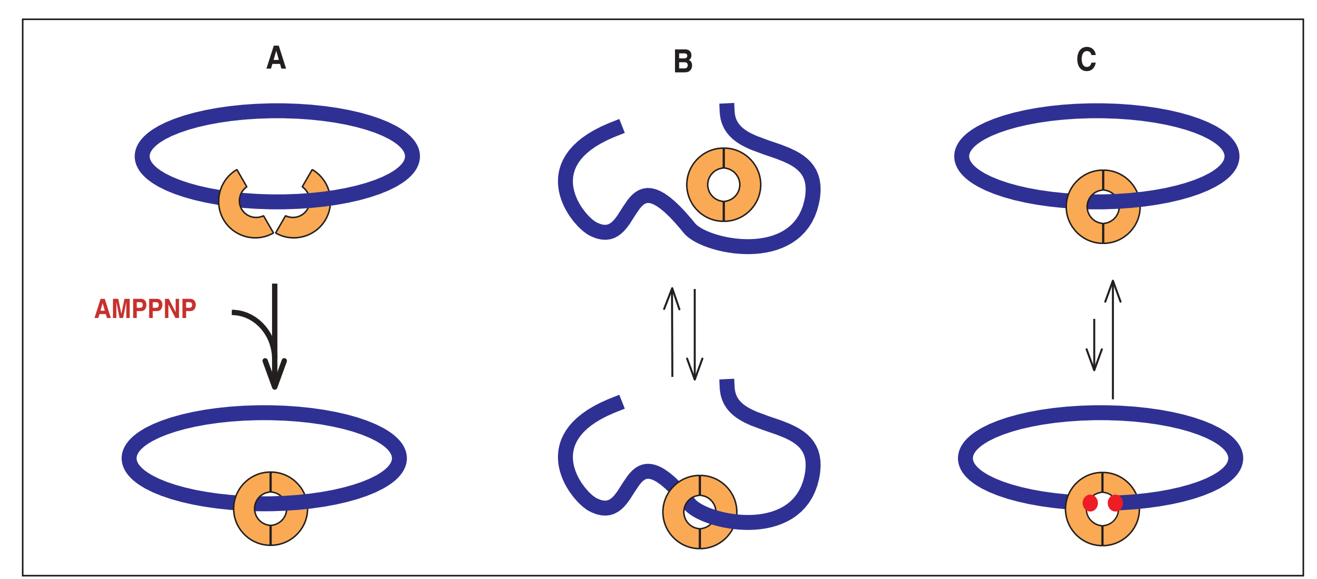
La comparación de las propiedades catalíticas y de la secuencia de aminoácidos lleva a una clasificación de las topoisomerasas en tres tipos o grupos evolutivos distintos: topoisomerasas de tipo IA, topoisomerasas de tipo IB y topoisomerasas de tipo II.

Las topoisomerasas de tipo IA cortan y empalman cadenas aisladas de ADN; forman el intermediario covalente con el cabo 5' del segmento escindido. Las de tipo IB cortan y empalman una de las cadenas en una doble hélice de ADN; establecen el intermediario covalente con el cabo 3' de la cadena escindida. Por último, las topoisomerasas de tipo II cortan y empalman ambas cadenas de una doble hélice simultáneamente, formando intermediarios covalentes con los cabos 5'. A diferencia de las dos primeras, las topoisomerasas de tipo II son enzimas homodiméricas, es decir, se constituyen con dos mitades idénticas; requieren ATP para su funcionamiento.

Enzimas fascinantes

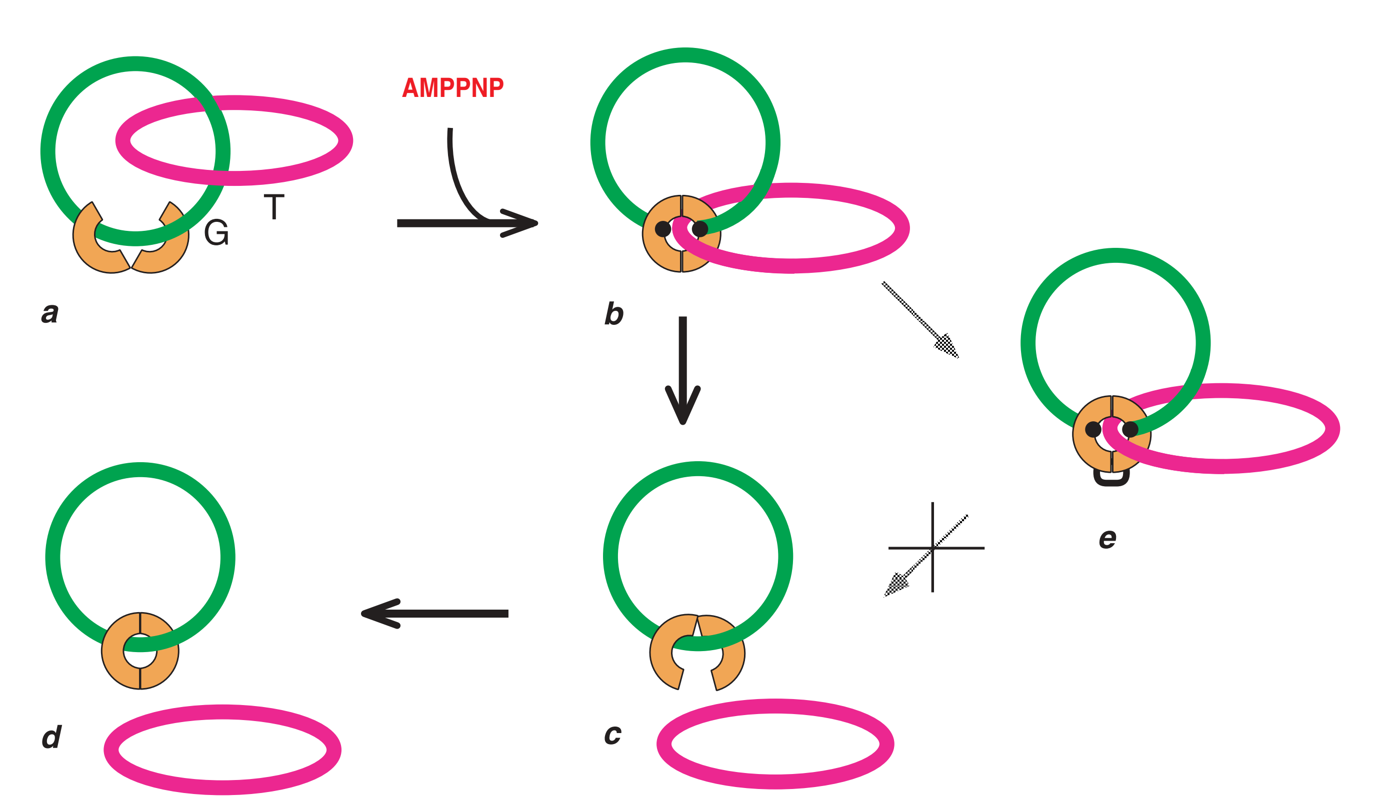
Resulta sorprendente que unas simples proteínas puedan cortar momentáneamente el ADN y sostener los extremos escindidos mientras transportan otro segmento de ADN a través de ellos. A este respecto, las topoisomerasas de tipo II provocan auténtica fascinación; téngase presente que, al cortar las dos cadenas de la doble hélice, ponen en continuo aprieto la integridad del genoma.

Interesado por el mecanismo de acción de las topoisomerasas de tipo II, me incorporé, en 1988, al laboratorio de James Wang en la Universidad de Harvard. Desde finales de los años setenta se conocía la actividad de estas enzimas. En varios tipos de células y bacterias se detectó una actividad enzimática, que en presencia de ATP y magnesio, era capaz de encadenar o anudar moléculas de ADN circulares, así como de alterar el número de enlace de la doble hélice de dos en

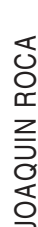


4. LA UTILIZACION DE MOLECULAS ANALOGAS AL ATP resultó decisiva para entender el papel de este cofactor energético en el mecanismo de acción de las topoisomerasas de tipo II. Una de ellas es el AMPPNP, un imido derivado del ATP que no puede hidrolizarse. La unión del AMPPNP a las topoisomerasas de tipo II provoca un cambio de conformación: la enzima se convierte en un anillo proteico alrededor del ADN. En moléculas de ADN circulares, la topoisomerasa queda así permanentemente anclada en la doble hélice, aunque puede deslizarse con libertad a lo largo de la misma (*A*). Si el ADN es lineal, la topoisomerasa puede disociarse, o engarzarse de nuevo, a través de sus extremos (*B*). Sólo el ADN ubicado en el interior del anillo se halla expuesto a ser cortado por la topoisomerasa (*C*).

JOAQUIN ROCA



5. CUANDO UNA TOPOISOMERASA DE TIPO II entra en interacción con un par de círculos encadenados (*a*), la unión del AMPPNP provoca un episodio de transporte de ADN (*b*), que terminará por soltar los círculos (*c*). Al final del proceso, el círculo utilizado como segmento G (*en verde*) permanece esposado por la topoisomerasa; el círculo utilizado como segmento T (*en rojo*) queda libre fuera del anillo proteico (*d*). Dado que el segmento G permanece unido a la enzima a lo largo del proceso, el segmento T debe ser capturado, transportado y expulsado del interior del anillo proteico por el lado opuesto al que ha entrado. Mediante la creación en el laboratorio de un enlace disulfuro en la compuerta de salida, puede bloquearse selectivamente la expulsión del segmento T (*e*).



dos unidades. Cuando se suspendía dicha actividad mediante detergentes o cambios bruscos de *p*H, se producían cortes irreversibles en ambas cadenas del ADN. No cabía duda de que las enzimas en cuestión constituían un tipo de topoisomerasas que transportaban una doble hélice de ADN a través de un corte transitorio en otra doble hélice de ADN.

Segmento G, segmento T

Si la doble hélice cortada, o segmento G (de "gate" o puerta), y la doble hélice transportada, o segmento T, residen en moléculas de ADN distintas, tales topoisomerasas producen un encadenamiento o desencadenamiento entre tales moléculas. Si ambos segmentos, G y T, pertenecen a la misma molécula de ADN, las topoisomerasas alteran el número de enlace en dos unidades, en cada ciclo de transporte; de lo que resulta un cambio del grado de superenrollamiento o de anudamiento del ADN. Estas modificaciones topológicas condicionan el volumen, forma y rigidez de las moléculas de ADN; son, pues, fácilmente detectables en el laboratorio mediante técnicas de sedimentación o electroforéticas.

En el transcurso de los años ochenta, varios laboratorios purificaron topoisomerasas de tipo II procedentes de virus, procariotas y organismos eucariotas. En todos los casos, se manifestaba una estrecha semejanza en sus propiedades bioquímicas. Cuando se identificaron los genes codificantes de estas proteínas, la homología en su secuencia de aminoácidos reveló que todas las topoisomerasas de tipo II guardaban un parentesco evolutivo y debían, por tanto, compartir los mismos rasgos estructurales y funcionales.

Las topoisomerasas de tipo II son enzimas homodiméricas de un tamaño cercano a 350 kilodalton. Según el organismo, cada mitad de la enzima constará de una o más subunidades codificadas por genes independientes. Así, en levaduras, la mosca de la fruta o células humanas, es decir, en los eucariotas, las topoisomerasas de tipo II son dímeros de una proteína de unos 170 kilodalton (unos 1400 aminoácidos aproximadamente). En bacterias, las topoisomerasas de tipo II constituyen tetrámeros formados por dos pares iguales de subunidades proteicas, dos de 80 kilodalton y dos de 90 kilodalton. Por fin, en los virus bacterianos, esas enzimas son hexámeros integrados por tres pares de subunidades.

El análisis de los cortes producidos en el ADN por las topoisomerasas de tipo II permitió descubrir que éstas se unían covalentemente al fosfato del cabo 5' en cada cadena de la doble hélice mediante una tirosina. En el caso de la topoisomerasa de tipo II de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* el

El autor

JOAQUIM ROCA, doctor en medicina por la Universidad de Barcelona, pasó siete años en el departamento de bioquímica de la Universidad de Harvard. En 1996 se incorporó al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en cuyo Instituto de Biología Molecular de Barcelona prosigue hoy su trabajo en torno a la topología del ADN.

aminoácido ocupa la posición 783. En nuestras investigaciones nos servíamos de esa enzima particular por razones prácticas: podíamos purificarla, entera o fragmentada, en gran cantidad y permitía la manipulación genética de su secuencia de aminoácidos.

Iniciamos nuestros experimentos abordando uno de los aspectos funcionales más intrigantes de las topoisomerasas de tipo II: su utilización del ATP. La región responsable de la unión e hidrólisis de ATP se encuentra en los primeros 300 aminoácidos de la proteína. En ausencia de ATP o en enzimas con mutaciones en el sitio de unión para este cofactor energético, no cataliza el transporte del segmento T, si bien la topoisomerasa mantiene su capacidad para cortar y empalmar las cadenas del segmento G. Estimamos que las topoisomerasas de tipo II consumen dos moléculas de ATP en cada operación de transporte de un segmento de ADN, lo que sugiere que cada mitad de la enzima une e hidroliza una molécula de ATP.

Función del ATP

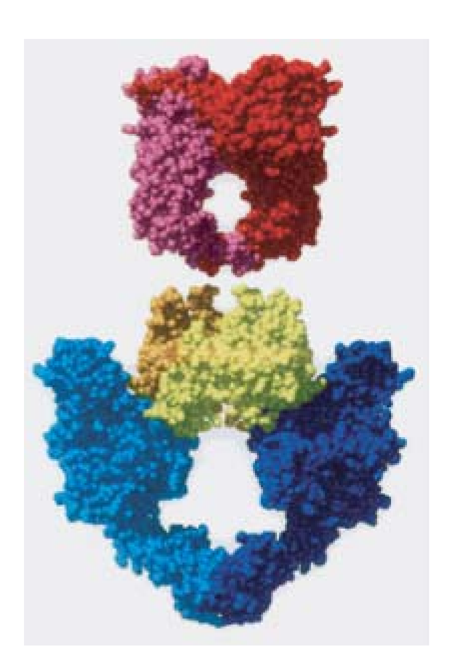
Resultó interesante advertir que el consumo de ATP no dependía de que el transporte de ADN conllevara un aumento o una pérdida de energía libre en el estado topológico del ADN. La mayoría de las topoisomerasas de tipo II tienden siempre a simplificar la topología del ADN, llegando a alcanzar valores de equilibrio incluso por debajo de los impuestos por la fluctuación térmica; es decir, minimizan el superenrollamiento, desanudan y desencadenan con gran eficiencia las moléculas de ADN.

La única excepción a este respecto la encontramos en la girasa de ADN. Como comentaré más adelante, la girasa es una topoisomerasa de tipo II especializada en reducir el número de enlace de la doble hélice; por tanto, sólo relaja el superenrollamiento positivo y genera superenrollamiento negativo en el ADN. El consumo de ATP de la girasa no deja de ser, sin embargo, similar al de otras topoisomerasas de tipo II.

Para estudiar la función del ATP en el proceso de transporte, fue clave la utilización de moléculas análogas al ATP que no pueden hidrolizarse o bien lo hacen con suma parsimonia. Ahora bien, cuando estos análogos se unen a la topoisomerasa, en vez del ATP, permiten a cada enzima realizar un solo ciclo de transporte de ADN. Basta, pues, la mera unión del ATP para desencadenar el transporte del segmento T. Además, la energía liberada por la hidrólisis del ATP debe utilizarse para regenerar la capacidad que tiene la topoisomerasa de iniciar un nuevo ciclo de transporte.

En 1986, Neil Osheroff observó que la adición de AMPPNP, un análogo no hidrolizable del ATP, incrementaba enormemente la fuerza de unión entre las topoisomerasas de tipo II y moléculas circulares de ADN. Esta unión era resistente a altas concentraciones de sal, pero no se trataba de un enlace covalente, puesto que podía disolverse mediante la aplicación de detergentes.

Paralelamente, en nuestro laboratorio, Janet Lindsley observó que el AMPPNP modificaba la sensibilidad de estas enzimas a determinadas proteasas. Cuando posteriormente realicé experimentos similares, comprobé que la unión del ATP o sus análogos a las topoisomerasas de tipo II producía un cambio en



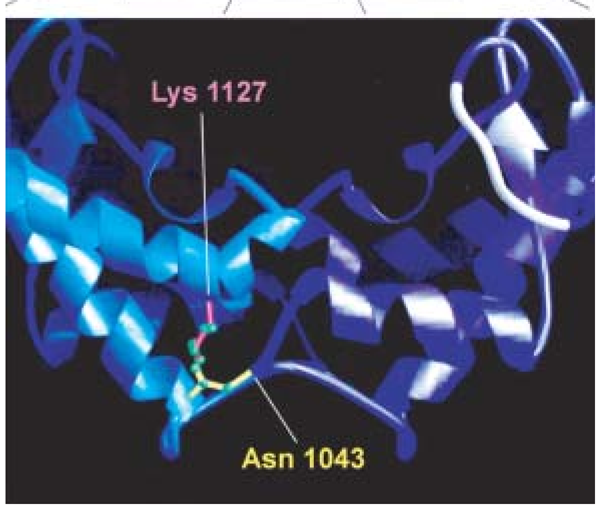


6. RECOMPOSICION DE LA ESTRUCTURA ATOMICA de las topoisomerasa de tipo II a partir de dos fragmentos de estructura conocida. El primer fragmento (*en rojo*), de 43 kilodalton, comprende los primeros 398 aminoácidos de la subunidad B de la girasa de *E. coli*. El segundo fragmento (*en amarillo y azul*), de 92 kilodalton, abarca los aminoácidos 410 a 1202 de la TOPO II de la levadura *S. cerevisiae*. El fragmento de 43 kilodalton es el dominio que dimeriza modulado por la unión e hidrólisis del ATP, mientras que el fragmento de 92 kilodalton posee los dominios responsables del corte y sellado del ADN; muestra éste en la parte inferior de su estructura la principal región de dimerización de la topoisomerasa. El panel de la izquierda ofrece la representación atómica completa; el de la derecha, el plegamiento de las cadenas de aminoácidos. Se distingue la posición en el interior de las tirosinas (*en rojo*) involucradas en el corte y sellado del ADN, así como la ubicación del ATP (*en verde*) que estabiliza la dimerización del dominio amino terminal de la enzima.

JOAQUIN ROCA

su conformación, de modo que la enzima se convertía en un toro o anillo proteico alrededor del ADN. A partir de aquí, sólo la hidrólisis del ATP permitía a la enzima recuperar su conformación inicial.

Cuando el anillo estaba cerrado, podía deslizarse con libertad a lo largo del ADN, pero sólo se disociaba a través de sus extremos; por ello, en moléculas de ADN circulares la topoisomerasa quedaba permanentemente esposada a la doble hélice. Si el anillo se formaba sin ADN en su interior, podía entonces enhebrar en él una molécula de ADN lineal y, luego, crear un círculo empalmando sus extremos. Sólo una molécula de ADN lineal podía enhebrarse a través del anillo; por tanto, el diámetro interno del anillo debería ser inferior a ocho nanómetros, un tamaño insuficiente para franquear el paso a una doble hélice de ADN doblada sobre sí misma. Como únicamente el ADN ubicado en el interior del anillo era susceptible de ser cortado por la topoisomerasa, el centro de corte y sellado del ADN debía encontrarse en el perímetro interior de la enzima.



7. CONOCIDA LA ESTRUCTURA ATOMICA de la principal región de dimerización de la topoisomerasa, fue posible crear mediante ingeniería genética un enlace disulfuro en esa zona. Para ello se sustituyó el aminoácido lisina de la posición 1127 y el aminoácido asparagina de la posición 1043 por cisteínas. La formación de un enlace covalente entre los átomos de azufre de las cisteínas, así creadas entre ambos lados del dímero, bloqueaba la salida del segmento T del ADN. Este enlace covalente podía eliminarse mediante oxido-reducción y en este caso el segmento T era capaz de salir del interior de la topoisomerasa. Este experimento demostraba inequívocamente que el segmento T del ADN cruzaba totalmente las dos mitades de la topoisomerasa durante cada ciclo de reacción.

JOAQUIN ROCA

Proceso de transporte

¿Qué relación hay entre los cambios estructurales, provocados por la unión e hidrólisis del ATP, con el proceso de transporte del ADN? Antes de responder a la pregunta, había que resolver otra cuestión: de qué modo una topoisomerasa de tipo II podía manipular los segmentos G y T durante el proceso de transporte.

Se me presentaban varias opciones. Una posibilidad era que la enzima se uniese primero al segmento T y, luego, al segmento G. En esta configuración, la topoisomerasa expulsaría al segmento T, a través del corte transitorio generado en el segmento G. Otra posibilidad sería que la enzima se uniera primero al segmento G y a continuación al segmento T, con lo que el proceso de transporte tendría que ir desde el exterior hacia el interior de la topoisomerasa. En este caso, la enzima se disociaría del segmento G en cada ciclo de transporte, para permitir la salida del segmento T de su interior, a no ser que el segmento T escapase del interior de la topoisomerasa por un sitio distinto del que había entrado.

Había pues tres mecanismos posibles: transporte del interior al exterior, transporte desde el exterior hacia el interior con una sola puerta de entrada y salida, o bien con puerta de entrada y salida distintas.

Para descubrir cuál de los modelos era correcto, analicé la interacción entre la topoisomerasa y mezclas de ADN circulares de distinto tamaño. Al añadir AMPPNP para provocar un ciclo de transporte en cada enzima, algunos de los círculos de ADN inicialmente unidos a la topoisomerasa se encadenaban en un segundo grupo de círculos. Observé que los segmentos G y T habían de estar presentes antes de que se produjera el cambio conformacional de la topoisomerasa, ya que los círculos añadidos posteriormente al AMPPNP nunca se agregaban a la cadena. Con estos experimentos se concluía que el segmento G era el primero en unirse en el interior de la topoisomerasa y no el segmento T. Asimismo, se sugería que la conformación en anillo generada por la unión del análogo de ATP servía para capturar el segmento T, llevándolo desde el exterior hacia el interior de la enzima, en donde era transportado a través del segmento G.

Si realizaba esos experimentos con una topoisomerasa incapacitada para transportar ADN, debido a una mutación en las tirosinas del centro de corte, la enzima seguía uniendo al segmento G en su interior, pero el segmento T no quedaba capturado al cerrarse el anillo. De lo que se desprendía que el proceso de captura y el de transporte se hallarían estrechamente acoplados.

¿Qué ocurre una vez que el segmento T ha cruzado el segmento G? Para averiguarlo construí moléculas de ADN circulares encadenadas por pares y uní una topoisomerasa a cada pareja de círculos. La adición de AMPPNP provocaba entonces un evento de transporte en cada topoisomerasa, que resultaba en la liberación de su pareja de círculos.

Observé que, una vez desencadenados, el círculo utilizado como segmento T siempre aparecía libre fuera del toro proteico; en cambio, el círculo utilizado como segmen-

to G permanecía esposado por la topoisomerasa. De ello se infería que, en cuanto el segmento T era capturado y transportado, se expulsaba de inmediato del anillo proteico. Dado que el segmento G seguía unido a la topoisomerasa durante todo el proceso, el segmento T debería forzosamente salir de la enzima por el lado opuesto al que había entrado.

Llegué así a la conclusión de que las topoisomerasas de tipo II funcionaban mediante un mecanismo de dos compuertas: una de entrada y otra de salida. El mecanismo de apertura y cierre de la compuerta de entrada estaría modulado por el uso de ATP. Por su parte, la compuerta de salida actuaría a modo de válvula de escape. Una vez la topoisomerasa se uniera a un segmento G, el enlace del ATP provocaría el cierre de la compuerta de entrada, lo que permitiría capturar el segmento T. El segmento T viajaría entonces entre las dos mitades de la enzima, cruzando en su trayecto el corte transitorio en el segmento G. Terminaría expulsado por el lado opuesto, a través de la fugaz apertura de la compuerta de salida.

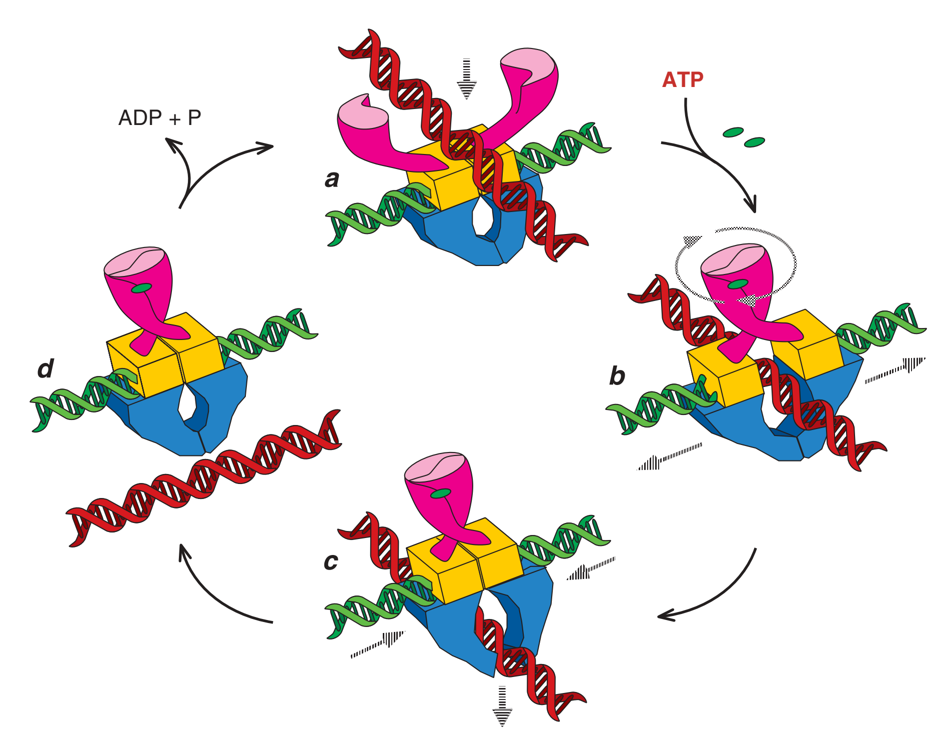
Pese a su demostración experimental, el modelo de dos compuertas fue recibido con cierto escepticismo. Niega este mecanismo que exista ningún contacto permanente entre las dos mitades de la topoisomerasa, tesis que parecía muy arriesgada, habida cuenta de que, cuando la topoisomerasa corta el ADN, cada mitad de la enzima tiene que sujetar uno de los cabos del ADN escindido. No obstante, la validez de nuestro modelo se confirmó en cuanto se conoció la estructura tridimensional de las topoisomerasas de tipo II.

Estructura tridimensional de la enzima

En 1991, Anthony Wigley, de la Universidad de Leicester, cristalizó y representó la estructura tridimensional de los primeros 398 aminoácidos del extremo amino terminal de la subunidad B de la girasa de la enterobacteria *Escherichia coli*. En este fragmento de 43 kilodalton, que se conserva en todas las topoisomerasas de tipo II, se encuentra la región responsable de la unión e hidrólisis del ATP. Los intentos iniciales de obtener la cristalización exclusiva del fragmento en cuestión fracasaron.

Pero no tardó en demostrarse que, si se añadía AMPPNP, el fragmento formaba un dímero tenaz, que cristalizaba con facilidad. La estructura del dímero revela que los tres fosfatos del AMPPNP (o ATP en su caso) coordinan la posición de varios aminoácidos involucrados en la dimerización del fragmento. Esta estructura sugería que la unión y la hidrólisis de ATP modulaba la dimerización y separación entre los extremos amino terminal de la enzima; lo que, en el marco de nuestro modelo, debería constituir la compuerta de entrada de la topoisomerasa.

En 1994, James Berger y Stephen Harrison, en nuestro departamento de Harvard, cristalizaron y obtuvieron la estructura de un fragmento notable, que comprendía los aminoácidos 410 a 1202 de la topoisomerasa tipo II de *S. cerevisiae*. La estructura de este fragmento de 92 kilodalton aportó valiosa información: contenía las tirosinas en posición 783 que intervenían en el corte y sellado del segmento G; incluía la región principal de dimerización de la topoisomerasa, que, de acuerdo con nuestro modelo de dos compuertas, debería ser cruzada en algún momento por el segmento T; por último, este fragmento complementaba al dominio amino terminal resuelto anteriormente, de modo que una estructura compuesta por ambos fragmentos poseía toda la capacidad funcional de una topoisomerasa de tipo II.

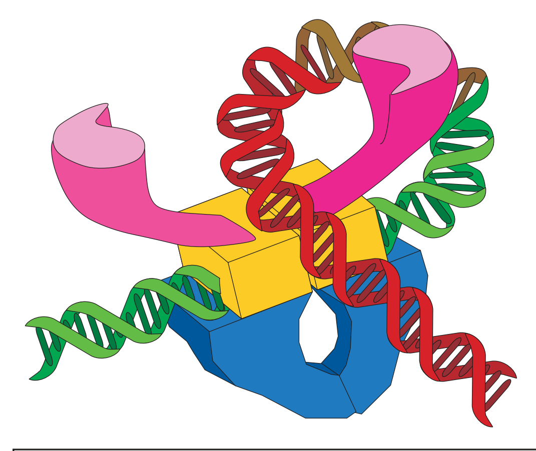


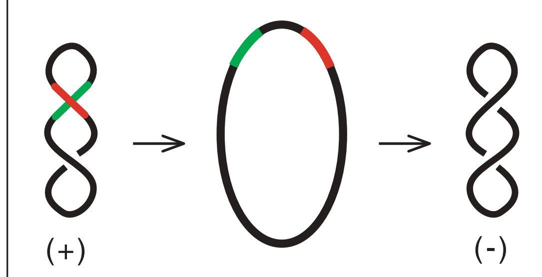
8. EL CONJUNTO DE INFORMACION ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL permite esbozar un modelo de una topoisomerasa tipo II activo. Cuando la topoisomerasa interacciona con el ADN, acomoda primero en su interior al segmento G (*en verde*) y queda a la espera de la aparición del segmento T (*en rojo*) (*A*). La unión del ATP provoca la dimerización de los dominios amino terminales (*en púrpura*); el cierre de esta compuerta captura al segmento T hacia el interior de la enzima (*B*). En su trayecto, el segmento T se abre paso a través del corte producido en el segmento G y alcanza la cavidad central de la topoisomerasa. Al sellarse de nuevo el segmento G, se estrecha el diámetro de la cavidad central; el segmento T se ve entonces forzado a salir de la misma cruzando la principal región de dimerización de la enzima (*C*). Una vez la compuerta de salida ha vuelto a cerrarse (*D*), la hidrólisis del ATP permite a la topoisomerasa adquirir su configuración inicial para empezar un nuevo ciclo de transporte de ADN.

JOAQUIN ROCA

El fragmento de 92 kilodalton cristalizó en la forma de un dímero toroidal de 12 × × 12 × 5,5 nanómetros, cuyo hueco interior tenía un diámetro medio de 5 nanómetros. Cada protómero contacta su pareja por arriba a través de la región amino terminal y, con mayor amplitud, a través de la región carboxi terminal por abajo, lugar que corresponde a la principal región de dimerización de la topoisomerasa. En la región amino terminal se perfila una hendidura rica en cargas positivas, que cruza el dímero transversalmente y en cuyo interior protruyen las tirosinas involucradas en el corte y sellado del ADN. De todo ello se desprendía que el segmento G se acomoda a lo largo de dicha hendidura. Sin embargo, la distancia entre las tirosinas era aquí superior a la necesaria para que la topoisomerasa pudiera cortar ambas cadenas de una doble hélice simultáneamente. Por ello, se concluyó que este fragmento había cristalizado en la conformación correspondiente al momento en que la topoisomerasa ha cortado y separado los cabos del segmento G.

Posteriormente, se obtuvieron cristales de este fragmento, en los que las tirosinas aparecían a la distancia esperada para realizar el corte del segmento G, lo que conlleva una importante reducción del diámetro de la cavidad central. La aproximación y separación de las tirosinas se explica por la flexibilidad de la principal región de dimerización de la topoisomerasa.





9. LA GIRASA es una topoisomerasa de tipo II. Una vez se une al segmento G, dobla el ADN en sentido dextrógiro; con ello se apropia del segmento T que debe transportarse. Esa es la causa de que la girasa utilice siempre segmentos G y segmentos T ubicados en la misma molécula de ADN y transporte unos a través de otros en el mismo sentido. De ese modo, la enzima sólo puede eliminar la superhelicidad positiva (+) y generar selectivamente superhelicidad negativa (–) en el ADN. Al margen de su especialización, la girasa funciona y consume el ATP igual que cualquier otra topoisomerasa de tipo II.

JOAQUIN ROCA

Un primer modelo físico

Podíamos ya esbozar un primer modelo físico de una topoisomerasa II con capacidad funcional. Bastaba con conectar el extremo carboxi terminal del dominio de 43 kilodalton con el extremo amino terminal del fragmento de 92 kilodalton, alineando los ejes de simetría de ambos dímeros. La estructura resultante concordaba con la que habíamos anticipado por medios bioquímicos. Permitía, además, modelar a la perfección el mecanismo de dos compuertas.

En efecto, antes de unirse al ADN, la topoisomerasa tendría una conformación abierta en forma de "v", con la principal región de dimerización ubicada en el vértice y sito cada uno de los dominios de unión del ATP en la punta de las aristas. Al interaccionar con el ADN, la topoisomerasa acomoda primero en su interior al segmento G; queda a la espera de que un segmento T se aproxime a la compuerta de entrada. La unión de ATP provoca el cierre de esta compuerta, lo que resulta en la captura del segmento T. En su trayecto desde el exterior hacia el interior de la enzima, el segmento T se abre paso a través del corte producido en el segmento G y alcanza la cavidad central de la topoisomerasa. Al sellarse de nuevo el segmento G, se reduce el espacio en la cavidad central y el segmento T es forzado a salir de la misma, encontrando su única puerta de salida en la principal región de dimerización de la enzima. Terminado este proceso, la hidrólisis del ATP provoca la reapertura de la compuerta de entrada y permite a la enzima iniciar un nuevo ciclo de transporte.

Apoyados en la información estructural, diseñamos un experimento que demostraba que el segmento T salía del interior de la enzima por el lado opuesto al que había entrado, tras cruzar la interfase entre las dos mitades de la topoisomerasa. Sustituimos algunos de los aminoácidos de la región principal de dimerización por cisteínas, con el fin de que pudieran formarse enlaces covalentes entre átomos de azufre entre ambos lados del dímero. Dado que la formación de estos enlaces puede modularse mediante oxido-reducción, podíamos controlar la apertura o el cierre permanente de la supuesta puerta de salida del segmento T.

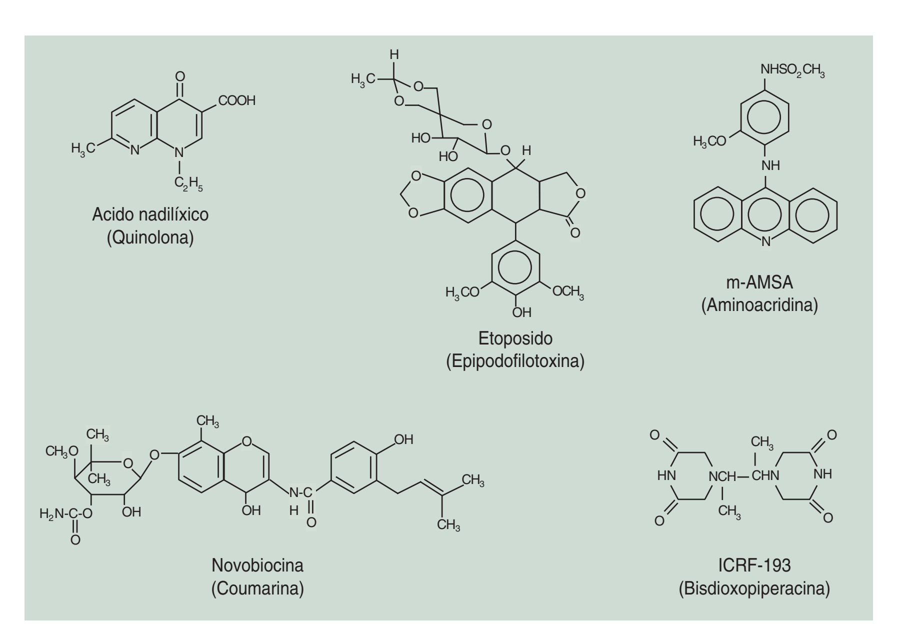
Cuando utilicé esta topoisomerasa para desengarzar parejas de anillos de ADN, observé que, una vez aprehendido y transportado, el segmento T se sitúa en la cavidad central de la topoisomerasa. Eso significa que ha entrado por arriba y cruzado en su camino al segmento G. Alcanzada la posición, el segmento T sólo salía del interior del anillo proteico cuando revertían los enlaces covalentes que impedían la fugaz apertura de la principal región de dimerización.

Girasa de ADN

Si bien las topoisomerasas de tipo II son un alarde de nanomecánica, algunas encierran un grado particular de complejidad. Sucede con la girasa de ADN, una topoisomerasa de tipo II ubicua en las bacterias. La girasa sólo puede reducir el número de enlace del ADN;

gracias a ello, elimina de forma selectiva superhelicidad positiva y genera superhelicidad negativa en el ADN. Para cumplir esa función, emplea siempre segmentos G y segmentos T contiguos en la misma molécula de ADN; y siempre transporta unos a través de otros en el mismo sentido.

La base estructural de semejante preferencia radica en el modo de interacción entre la girasa y el ADN. Una vez unida al segmento G, la topoisomerasa dobla el ADN en sentido dextrógiro, con lo que se proporciona a sí misma el segmento T que debe ser capturado. A partir de aquí, la girasa opera como todas las topoisomerasas de tipo II.



10. NUMEROSOS COMPUESTOS de interés farmacológico alteran la actividad de las topoisomerasas de tipo II. En su operación emplean mecanismos diversos. La mayoría de tales medicinas atentan contra el proceso de corte y sellado del segmento G; inducen, en particular, que las topoisomerasas de tipo II produzcan roturas en el ADN. Pertenecen a ese grupo las quinolonas (ácido nadilíxico, norfloxacina y ciprofloxacina), que desarrollan una potente actividad antibiótica. Otros fármacos de estructura química muy distinta, como las aminoacridinas y epipodofilotoxinas, alteran el sellado del ADN; se prescriben por su eficacia en la terapia antitumoral. Las coumarinas (grupo en el que se integran la novobiocina, coumericina y clorobiocina) impiden la unión del ATP a las topoisomerasas de tipo II. Hay, por último, compuestos que bloquean los movimientos de la topoisomerasa durante el transporte de ADN. Las bisdioxopiperacinas, por ejemplo, impiden la reapertura de la compuerta de entrada de las topoisomerasas de tipo II.

Aplicaciones

El avance en los estudios estructurales y funcionales u operativos de las topoisomerasas de tipo II repercute en varios ámbitos. En el campo de la enzimología, estas proteínas representan una de las máquinas moleculares más refinadas y sobresalientes. En cuanto a sus implicaciones biológicas, conocemos mejor cómo se eliminan los encadenamientos y anudamientos entre cromosomas, así como la modulación de la superhelicidad del ADN intracelular.

Por último, incide en el avance de la farmacología clínica. Numerosos antibióticos y drogas antitumorales ejercen sus efectos porque alteran de modo específico la actividad de las topoisomerasas de tipo II. La explicación es sencilla. Tales enzimas constituyen un auténtico "talón de Aquiles" para la viabilidad celular. Su mal funcionamiento genera el caos en la topología del ADN y roturas irreversibles en el genoma, lo que aboca en la muerte celular. Las células que se caracterizan por una alta tasa de proliferación (por ejemplo, las tumorales o las bacterias) poseen una elevada actividad topoisomerásica y son, por tanto, las más susceptibles a drogas que afectan a estas enzimas.

Hoy conocemos múltiples compuestos que, mediante distintos mecanismos, alteran la actividad de las topoisomerasas de tipo II. La mayoría de estas drogas inciden de una forma selectiva en el proceso de corte y sellado del segmento G; inducen que la topoisomerasa produzca roturas irreparables en el ADN. Dentro de este grupo cabe destacar a las quinolonas y sus derivados, utilizadas como potentes antibióticos, y a las drogas de eficaz actividad antitumoral, como son el m-AMSA y el etoposido. Otros compuestos impiden la unión del ATP a la enzima; tal ocurre con el ácido nadilíxico y sus análogos. Por último, hay diversidad de moléculas de elevada toxicidad para la célula que bloquean los movimientos que hacen las topoisomerasas de tipo II durante el transporte de ADN.

El uso reiterado de esa batería de fármacos genera, sin embargo, la aparición de mutaciones que convierten a las células en resistentes a la acción de los mismos. Sólo el avance en los estudios estructurales y bioquímicos de estas enzimas nos permite seguir en esta carrera y diseñar nuevos compuestos con potencial terapéutico. Entretanto, como auténticos magos del universo molecular, las topoisomerasas de tipo II siguen manteniendo al ADN intracelular en paz y orden.

JOAQUIN ROCA

Bibliografía complementaria

THE CAPTURE OF A DNA DOUBLE HELIX BY AN ATP-DEPENDENT PROTEIN CLAMP: A KEY STEP IN DNA TRANSPORT BY TYPE II DNA TOPOISOMERASES. Joaquim Roca y James C. Wang, en *Cell*, vol. 71, págs. 833-840; 1992.

DNA TRANSPORT BY A TYPE II DNA TOPOISOMERASE: EVIDENCE IN FAVOUR OF A TWO-GATE MECHANISM. Joaquim Roca y James C. Wang, en *Cell*, vol. 77, págs. 609-616; 1994.

THE MECHANISM OF DNA TOPOISOMERASES. Joaquim Roca, en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 20, págs. 133-168; 1995.

El ambiguo éxito de los hermanos Wright

Su mérito estribó en conseguir controlar el avión una vez en el aire. Quisieron perfeccionar su invento en secreto; casi les costó la gloria

Dan Schlenoff

Orville Wright despegó el 17 de diciembre de 1903 en un avión a motor, voló durante 12 segundos, recorrió 37 metros y se estampó contra la arena. Un siglo después, conmemoramos esa fecha como un hito de la aviación; pero sólo con ese vuelo, cuesta sostener que los hermanos Wright tuvieran mayor éxito que otros inventores, que ya habían volado más lejos. Y se habían estrellado de peor manera.

Los hermanos Wright aún tardaron dos años más en construir y hacer volar el primer avión verdaderamente controlable de la historia. Por desgracia, mientras no se sintieron seguros de poder vender un invento perfeccionado, procedieron con mucho secreto, tanto, que movió a *Scientific American* y otras publicaciones de la época al escepticismo e impidió que sus colegas, y el público en general, apreciasen su trabajo.

Otros a los que se les conceden los laureles de haber construido el "primer aeroplano" no lograron sino vuelos cortos o incontrolados. El primer despegue propulsado se puede atribuir a Clément Ader, pero en 1890 su avión a vapor alcanzó una altitud de veinte centímetros, suficiente para clasificarlo como vuelo sólo para sus compatriotas franceses. Gustave Whitehead, alemán, era dado a inventar historias sobre sus experiencias aéreas en Estados Unidos, pero nunca construyó un avión práctico. Los neozelandeses están orgullosos de Richard Pearse: en marzo de 1903 este solitario y excéntrico agricultor hizo volar su monoplano de bambú y lona a lo largo de unos 123 metros, antes de estrellarse contra un seto de espinos.

El control era la clave

Wilbur Wright afirmaba en 1901, en una charla ante la Sociedad Occidental de Ingenieros de Chicago, que el mayor obstáculo para un avión operativo era "el equilibrio y la dirección de la máquina una vez en verdadero vuelo". Los Wright dieron, por tanto, prioridad al desarrollo de un método de control en el aire. También comprendieron que, al igual que un ciclista necesitaba aprender a montar en bicicleta, un piloto tendría que aprender a volar.

Los Wright estudiaron el trabajo de Otto Lilienthal, un ingeniero alemán considerado por muchos el primer piloto de la historia. Lilienthal realizó miles de vuelos en depurados planeadores diseñados por él mismo, que dirigía con el desplazamiento de su cuerpo, como hoy los pilotos de ala delta. Falleció, sin embargo, a consecuencia de un accidente de vuelo; los Wright concluyeron que necesitaban un método de control más adecuado para aviones lo bastante grandes como para llevar motor. Pensaron que, si se pudiesen doblar los bordes de las alas durante el vuelo, se podrían mantener el equilibrio y la dirección de la máquina.

1. WILBUR y ORVILLE WRIGHT (*izquierda y derecha*), **impresores, fabricantes de bicicletas e inventores del avión con motor.**



AP PHOTO

En agosto de 1899 los Wright se tomaron un descanso en su rentable negocio de bicicletas en Dayton, Ohio, y construyeron una pequeña cometa biplana de una envergadura de metro y medio para probar algunas de sus teorías. La cometa llevaba unos cables que doblaban ligeramente las alas mientras estaba en el aire. Un elevador, una pequeña ala situada delante del ala principal, estabilizaba el cabeceo del ingenio (el movimiento ascendente y descendente). Los prometedores resultados les animaron en 1900 a fabricar una versión a escala mayor, con una superficie alar de 15 metros cuadrados.

Llevaron su cometa a Kitty Hawk, en los Bancos Exteriores de Carolina del Norte, donde soplaban brisas estables procedentes del océano Atlántico y unas dunas de arena de suave pendiente proporcionaban espacio y garantizaban un aterrizaje blando. Los Wright quedaron bastante satisfechos con los resultados de sus experimentos. Volvieron allá en 1901 con un ambicioso planeador, mucho mayor, pero regresaron a Dayton desconcertados por los problemas con que tropezaron en los datos aeronáuticos. Para perfeccionar el diseño de sus alas, construyeron un túnel de viento y probaron en él más de 60 modelos de perfiles.

El planeador de 1902 se inspiró en la información así obtenida. Las alas eran largas y estrechas. Añadieron una doble cola vertical para controlar la guiñada (el movimiento lateral). El piloto se tumbaba boca abajo, sujeto por un bastidor a la altura de la cadera, y su propio movimiento lateral tiraba de los cables que doblaban las alas y controlaban la dirección del vuelo. Ese verano, ambos hermanos acumularon en Kitty Hawk muchas horas de vuelo sin motor con este planeador.

Tras haber construido un avión sin motor y aprendido a pilotarlo, se embarcaron en la creación de una versión motorizada y más robusta. Los motores de automóvil eran demasiado pesados. Por ello diseñaron uno propio. Lo construyeron con una aleación de cobre-aluminio.

Para encontrar la forma óptima de las hélices, volvieron de nuevo a las pruebas en el túnel de viento; trataban la hélice como un ala pequeña en rotación. Su diseño final tenía un rendimiento de casi un 70 por ciento, sólo un 10 por ciento inferior a las versiones modernas. Montaron dos de estas hélices en la parte trasera del avión (*véase el recuadro* "Un mito sobre los hermanos Wright"). Las hacían girar en sentidos opuestos para contrarrestar los problemas que pudiera haber con los pares de fuerzas.

El gran día

El 17 de diciembre de 1903, en Kill Devil Hill, cerca de Kitty Hawk, los Wright colocaron su Flyer I (Volador I) en el carril de lanzamiento, asentado sobre arena plana. Orville estaba a los mandos; se decidió lanzando una moneda. Arrancaron el motor; Wilbur corrió al lado del avión guiando el ala; el ingenio se sustentó en el aire brevemente. Cabe dudar si este primer vuelo del día fue un vuelo controlado o si se quedó en simple salto. En cambio, el cuarto y último, pilotado por Wilbur, recorrió 260 metros en 59 segundos: los Wright habían logrado un vuelo libre controlado y sostenido con una máquina a motor más pesada que el aire. Nueve días después, *Scientific American* informaba cautelosamente: "Este es un decidido paso hacia adelante de la navegación aérea con aeroplanos".

Los Wright triunfaron como inventores de aviones. Por desgracia, fueron unos horribles empresarios aeronáuticos. Les preocupaba tanto una posible pérdida del dominio económico de su invento, que lo man-



2. EL AVION DE LOS WRIGHT en su primera demostración pública, pilotado por Wilbur. Sus vuelos con el modelo A el 8 de agosto de 1908, en un hipódromo cerca de Le Mans, mostraron que los Wright iban muy por delante de cualquier competidor.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCIV, N.º 9, 29 DE AGOSTO DE 1908

tuvieron alejado no sólo de los inoportunos ojos de los competidores, sino también de los potenciales clientes y de aquellos que podrían haberles ayudado a difundir sus progresos. Cuando se les concedió la patente número 821.393 en mayo de 1906 (tras una espera de tres años), no creyeron que ofreciera mucha protección, opinión que, como se demostraría, estaba justificada.

De vuelta a Dayton, en Huffman Prairie, siguieron esforzándose en construir una máquina voladora comercial. Con su Flyer 2 realizaron más de cien vuelos cortos. Abandonaron el carril de lanzamiento por una catapulta, para facilitar el despegue. Seguían evitando la publicidad, con la consiguiente frustración de los entusiastas de la aviación, emocionados por los retazos de noticias que se filtraban. En junio de 1904, con un incesante goteo de rumores procedentes de Dayton, *Scientific American* se quejaba: “Se mantuvo la prueba en gran secreto, y sólo unos pocos han podido ser testigos”.

Al menos hubo uno, el apicultor Amos Ives Root. Reseñó lo que vio en su propia revista, dedicada a los asuntos de su profesión, *Gleanings in Bee Culture*, el 1 de enero de 1905. Decía que *Scientific American* declinó publicar su artículo. No tenemos constancia del porqué, pero quizás el estilo fuese demasiado florido para el gusto de la redacción. Así empezaba: “Tengo que contarles una maravillosa historia. Una historia que, en algunos aspectos, supera a los cuentos de las Mil y Una Noches. Una historia con su moraleja. Una historia de la que muchos jóvenes, creo yo, tendrían que aprender. Y quizá también algunos mayores, en caso de que quieran escuchar”.

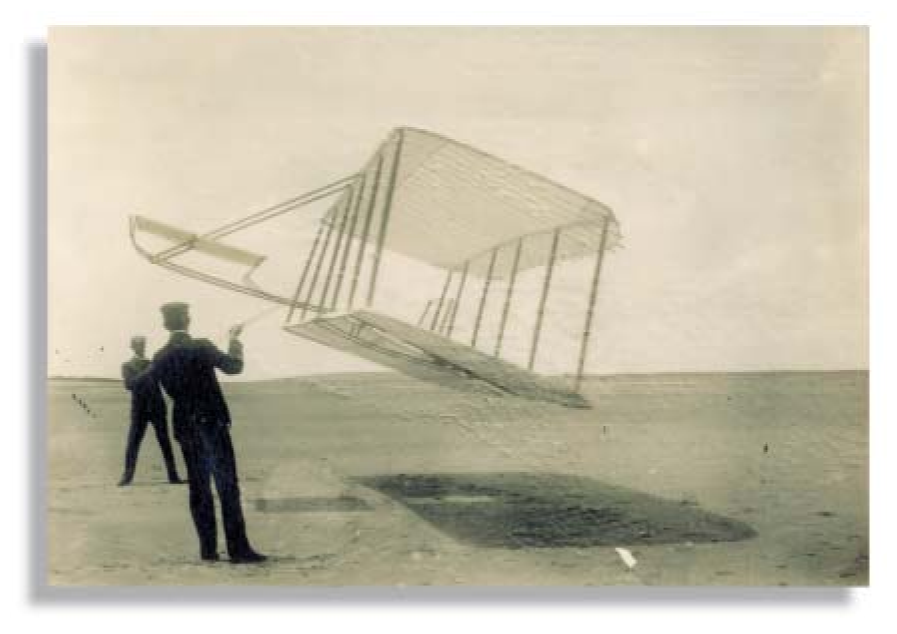
El Flyer 2 y el Flyer 3 resultaron tan difíciles de manejar como el Kitty Hawk Flyer. Eran frecuentes los aterrizajes violentos (es preciso recordárselo a quienes intenten recrear aquellos aviones). Un accidente en julio de 1905 obligó a los Wright a realizar una radical y fortuita reconstrucción del Flyer 3. Ampliaron las superficies de control y las alejaron del centro de gravedad. El 5 de octubre de 1905 el aeroplano, con Wilbur a los mandos, voló 40 kilómetros en 39,5 minutos.

Los Wright habían desarrollado el primer avión del mundo verdaderamente práctico. Se habían ganado la consideración de pioneros de la aviación. Pero el laurel sólo se lo otorgaría la historia, ya que permitieron a muy pocos observar o fotografiar su aeroplano en pleno vuelo. En 1990 se nombraría al Flyer 3 Hito Histórico Nacional. Ningún otro avión ha recibido ese honor.

Los Wright intentaron vender su creación al ministerio de la Guerra de los Estados Unidos, a los franceses, a los británicos y a los alemanes. Pero se negaron a exhibir sus prestaciones de vuelo sin haber firmado antes un contrato de ventas. No es sorprendente que los potenciales clientes se mostrasen reacios a comprar un dispositivo tan nuevo sin ver antes si funcionaba.

Incapaz de obtener información adicional de, o sobre, los Wright, *Scientific American* comentaba en tono malhumorado en un artículo de enero de 1906: “Parece que estos supuestos experimentos se realizaron en Dayton, Ohio, una población bastante grande, y que los periódicos de los Estados Unidos, pese a estar alerta, dejaron que las sensacionales demostraciones escapasen a su atención”.

Los franceses apodaron a los Wright “faroleros”. Una revista aeronáutica alemana llamó a sus vuelos “farol americano”. Los Wright, sin embargo, no pensaban que su máquina voladora estuviese aún tan avanzada como para mostrarla en público.



3. TEORIZAR, PROBAR, REFINAR: **Los Wright aplicaron las lecciones que aprendieron en máquinas voladoras más sencillas. Esta fotografía, de hace más de un siglo, les muestra realizando experimentos con su planeador/cometa cerca de Kitty Hawk, Carolina del Norte, en 1901.**

La fama es esquiva

Mientras tanto, lejos de Dayton, en Francia, el brasileño Alberto Santos-Dumont realizaba la primera exhibición pública del vuelo de un avión. Despegó de un campo el 12 de noviembre de 1906 y recorrió 220 metros. Como no había ninguna prueba de lo contrario en aquella época, fue aclamado como el primer hombre en volar. Sus compatriotas aún hoy veneran a Santos-Dumont, por su hazaña y su incansable dedicación al vuelo, como el Padre de la Aviación.

Con el propósito de estimular las innovaciones aeronáuticas, el Aeroclub de América y *Scientific American* ofrecieron un premio en 1907 al primero que volara un kilómetro en línea recta. Los Wright seguían enfrascados en conseguir contratos de venta y no participaron. Glenn Hammond Curtiss y la Asociación de Experimentos Aéreos, respaldada por Alexander Graham Bell, ganaron el trofeo con el aeroplano June Bug gracias a su triunfal vuelo del 4 de julio de 1908. Debido a este éxito y a la importancia de Curtiss en la primitiva aviación norteamericana como piloto e inventor, muchos creyeron en Estados Unidos que fue el primero en volar.

Antes de mostrar al público su aeroplano, los Wright esperaron hasta el día en que tuvieron ya casi consumada la venta de aviones, tanto al Ejército de los Estados Unidos como a una compañía francesa. El 8 de agosto de 1908, en un hipódromo cerca de Le Mans, Wilbur, a bordo de su Wright Model A Flyer, asombró a los espectadores con múltiples vuelos en los que exhibió una habilidad de pilotaje y un avance técnico sin precedentes. Los Wright fueron aclamados como héroes.

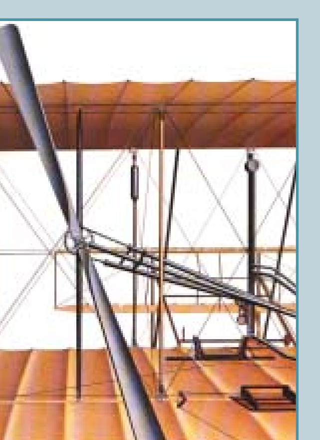
Alcanzaron la cumbre de su fama en 1909. En el otoño de ese año, puede que un millón de atónitos espectadores viesen volar a Wilbur sobre el puerto de Nueva York y alrededor de la estatua de la Libertad; unos días después, una multitud similar asistió a su sobrevuelo del río Hudson.

Pero talento y dinero se volcaron enseguida en la nueva y apasionante industria. Los hermanos Wright iban a quedarse atrás muy pronto. En 1911 varias compañías, sobre todo europeas, fabricaban aviones más seguros, rápidos y maniobrables que los modelos de los Wright.

Wilbur murió de fiebre tifoidea en 1912. Orville siguió luchando contra la creciente marea de competidores y litigando en largos pleitos por infracción de patentes. Para 1915 se había cansado del negocio de la aviación. Lo dejó, pero no cejaría en la pugna por afianzar su lugar en los libros de historia: el de la mitad del dúo que tanto había trabajado, y con tanto éxito, por lograr que un aparato más pesado que el aire volase.

Un mito sobre los hermanos Wright

Corre la creencia de que a los hermanos Wright se los consideraba en su época unos chiflados porque "todo el mundo sabía que volar era imposible". Es falso. Esta ficción se basa en lo que a principios del siglo pasado escribieron varios escépticos, principalmente Simon Newcomb, un destacado astrónomo, que advirtió sobre la dificultad de aumentar la potencia necesaria en una maqueta hasta la precisa para un avión de tamaño real. Se había estado volando desde 1783, año en que los hermanos Joseph-Michel y Jacques Etienne Montgolfier inventaron un globo de aire caliente utilizable. En 1903, los vuelos de globo con motor y la elevación de planeadores eran habituales; los motores ganaban en ligereza y potencia. La conjunción de los elementos, sin embargo, se reconocía como complicada, arriesgada y costosa, pero pocos pensaban que el vuelo de un avión sería siempre "imposible". El amor al secreto de los Wright fue la razón del escepticismo de *Scientific American* (y de muchas otras publicaciones) acerca de sus logros.



ILUSTRACION de una sección del Flyer de 1903, con una de sus hélices de 2,6 metros de longitud. Figuró en la portada de nuestro número de septiembre de 1979.

CORTESIA DE SPECIAL COLLECTIONS AND ARCHIVES, UNIVERSIDAD ESTATAL WRIGHT STATE (*arriba*); *INVESTIGACION Y CIENCIA*, N.º 36, SEPTIEMBRE 1979 (*abajo*)

China espacial

China acaba de mandar su primer astronauta al espacio. Espera convertirse así en una nueva potencia espacial

James Oberg

La astronave *Shenzhou 5* despegó del Centro Espacial de Jiuquan, cercano al borde del desierto de Gobi, en la China septentrional, a las nueve de la mañana, hora de Pekín, del 15 de octubre de 2003. El ingenio, cuyo nombre significa "navío divino", medía casi nueve metros de longitud y rozaba las nueve toneladas de peso. Lo lanzó un cohete Chang Zheng ("Larga Marcha"). Las cuatro *Shenzhou* que precedieron a ésta efectuaron vuelos orbitales, pero a diferencia de aquellos vehículos de prueba no tripulados, éste llevaba a bordo a un astronauta, el teniente coronel Yang Liwei, de 38 años de edad, antes piloto de cazas —tras el vuelo, se le ha ascendido a coronel—. China se convertía así en el tercer país que enviaba a una persona al espacio por medios propios.

Tres docenas de países han puesto en órbita a algún nacional suyo, pero todos viajaron en naves norteamericanas o rusas. En su empeño por contar con un programa espacial propio, China se ha procurado, y adaptado, técnicas creadas en Rusia y EE.UU. A los expertos, muchas características de la *Shenzhou* les resultan familiares; a primera vista parece una versión, en un tamaño algo mayor, de la nave rusa Soyuz. Sin embargo, algunos de los sistemas fundamentales han sido diseñados por la agencia espacial china; en ciertos aspectos, la *Shenzhou* supera técnicamente a la Soyuz.

Este primer vuelo tripulado de la *Shenzhou* tendrá profundos ecos diplomáticos. Además de cosechar prestigio internacional, China confía en que el programa estimule el progreso de sus industrias aeroespacial, informática y electrónica. Si las primeras misiones tienen éxito, es probable que China establezca su propia estación espacial en órbita terrestre. Dentro de diez años, las actividades espaciales chinas bien podrían superar a las de Rusia y la Agencia Espacial Europea. Y si China se convierte en la potencia espacial más importante después de EE.UU., puede que otra "carrera espacial" se divise en lontananza.

El vuelo

Las ambiciones espaciales de China se remontan a 1970, cuando un cohete Chang Zheng puso en órbita su primer satélite. Mientras circundaba la Tierra, aquel artefacto de un metro de envergadura transmitía la canción patriótica "El Este es rojo". A inicios de los años noventa, el presidente Jiang Zeming dio luz verde a un programa espacial tripulado, decisión que desencadenó una actividad constructora tan impresionante, en algunos aspectos, como la de la NASA, a raíz del proyecto Apolo, en los años sesenta. En el Centro Espacial de Jiuquan, el más antiguo y extenso de los complejos chinos de lanzamiento de misiles y satélites, se terminaron un hangar de montaje de cohetes y una plataforma de lanzamiento a tiempo para el primer vuelo de una *Shenzhou* no tripulada. Aunque el organismo responsable, la Academia China de Tecnología Espacial, se ha guardado algunos secretos —el entrenamiento de los astronautas, por ejemplo—, en la prensa china han aparecido numerosos detalles técnicos de la astronave.

La *Shenzhou* se compone de tres módulos. La tripulación viaja en una unidad que recuerda a un tazón —el módulo de mando, como la habría llamado la NASA, o de reentrada—; allí se encuentran los cuadros de control y yacen en posición horizontal los tripulantes durante el despegue. El módulo de mando lleva conectada a su parte delantera una unidad cilíndrica presurizada, el módulo orbital, que facilita un espacio de trabajo adicional. Detrás del módulo de mando



1. *SHENZHOU 5,* la primera astronave china tripulada, orbitó la Tierra el 15 de octubre y primeras horas del 16 con un astronauta a bordo. Mide nueve metros de largo. Lleva dos paneles solares y cuatro motores principales. Podría haber transportado hasta tres tripulantes. China se ha convertido así en el tercer país (tras EE.UU. y Rusia) que envía al espacio un vehículo con seres humanos a bordo.

ALFRED T. KAMAJIAN

viene una sección cilíndrica (el módulo de servicio o propulsión), con los motores cohete y un generador de energía eléctrica. En ese módulo se despliega un par de paneles solares, con un área total de 24 metros cuadrados.

El nombre oficial del vehículo de lanzamiento es *Chang Zheng 2F*, pero también lo llaman poéticamente *Shen Jian* ("flecha divina"). Se trata de una versión del *Chang Zheng 2E* —un cohete, derivado de los misiles militares chinos, de combustible líquido—, con mejoras que han aumentado su seguridad y lo han convertido en apto para vuelos tripulados. Al igual que otros vehículos de lanzamiento de la misma familia diseñados para mayores cargas útiles (es decir, los tripulantes y la instrumentación), cuatro cohetes auxiliares que circundan el cuerpo principal del lanzador refuerzan los cuatro motores originales. Todos esos motores se propulsan con tetróxido de nitrógeno e hidracina, en vez de con el hidrógeno líquido de los motores principales de las lanzaderas espaciales de la NASA, más potente, pero de manejo más delicado. Los 604.000 kilopondios (kp) de empuje, en el momento del despegue, de la *Shen Jian* la sitúan entre el cohete que suele lanzar las Soyuz (411.000 kp) y el Saturno 1B (740.000 kp) que llevó varias cápsulas Apolo a sus órbitas terrestres.

La *Shenzhou 5* siguió la misma secuencia de vuelo que sus cuatro predecesoras no tripuladas. Tras el despegue, el cohete portador arrumbó al este. Cruzó la línea costera china por las cercanías de Qingdao (emplazamiento de una nueva estación de seguimiento). Cruzó el mar Amarillo con una aceleración máxima de unos 5 g (g es la aceleración de la gravedad). Cuando pasó al sur de la isla japonesa de Kyushu, estableció contacto con un gran buque de comunicaciones. Adquiría una velocidad orbital de unos ocho kilómetros por segundo y entraba a las 9:10 en una órbita elíptica (200 × 343 km) inclinada 42,4 grados, algo más ecuatorial que la trazada por la Estación Espacial Internacional, inclinada 52 grados. A las 15:57 se modificó la órbita; se convirtió en circular, a una altura de 343 kilómetros. Yang Liwei no entró en ningún momento en el módulo orbital; durmió seis horas, divididas en dos períodos de tres.

Como la nave tenía que acabar en una zona de aterrizaje situada en Mongolia Interior, a unos 500 kilómetros al este del Centro Espacial de Jiuquan, las maniobras previas a la reentrada comenzaron a las 5:04 del 16 de octubre, hora de Pekín, cuando se hallaba todavía a medio globo de distancia, sobre el Atlántico Sur. A las 5:35 el Centro de Mando y Control daba la orden de iniciar la reentrada. El módulo orbital se desprendió a las 5:36, en la 21ª órbita de la *Shenzhou*; permanecerá seis meses alrededor de la Tierra. Dos minutos después, se encendía en el módulo de servicio un pequeño cohete de frenado para aminorar la velocidad del ingenio en unos 200 metros por segundo. Esa maniobra permitió que la gravedad terrestre atrajese la cápsula hacia la atmósfera superior, donde la resistencia del aire la frenó aún más. A las 5:59, los módulos de mando y de servicio se separaron. Mientras éste ardía en la atmósfera, el escudo térmico de la base del primero protegía al tripulante de las abrasadoras temperaturas de la reentrada.

La secuencia de aterrizaje siguió el patrón de las astronaves Soyuz y Apolo. Tras una deceleración a un número bastante alto de g, el módulo de mando cayó libremente a través de la atmósfera inferior. Primero, a una altitud de unos 30 kilómetros, se abrieron un pequeño paracaídas y luego el principal, tras lo cual se desprendió el pesado escudo térmico. La toma de tierra en la estepa, que se produjo a las 6:23, se suavizó gracias a un conjunto de cohetes situados en la base de la cápsula. A las 6:28 localizó un equipo de rescate el punto de aterrizaje, a 4,8 kilómetros del previsto. Unos minutos después, cinco helicópteros se dirigían a ese lugar. A las 6:51, el astronauta salía de la cápsula.

¿Una copia de la Soyuz?

La *Shenzhou 1*, el primer vehículo de prueba no tripulado, se lanzó el 20 de noviembre de 1999 y no estuvo ni un día en órbita (como la 5). En cada uno de los tres vuelos que siguieron (lanzados el 10 de enero de 2001, el 25 de marzo de 2002 y el 30 de diciembre de 2002), la nave pasó una semana en órbita y se ensayaron equipos cada vez más refinados. La *Shenzhou 2* transportaba, según se cuenta, un mono, un perro y un conejo para ensayar los sistemas de supervivencia a bordo. De la *Shenzhou 4* se dijo que era una nave acondicionada para llevar tres seres humanos. Al parecer, unos astronautas tomaron parte en la cuenta atrás desde el interior del módulo de mando, que abandonaron sólo pocas horas antes del despegue.

Por el parecido exterior de la *Shenzhou* con la Soyuz, muchos observadores concluyeron que no era sino una imitación, sólo con leves modificaciones. Según David Baker, de la publicación británica *Jane's Space Directory*, la *Shenzhou* era "en medida muy considerable, una Soyuz, casi como salida del mismo molde". Pero Brian Harvey, autor de *El programa espacial chino: desde su creación hasta sus futuras posibilidades*, se muestra crítico con esa opinión. "Sobre el programa espacial chino hay muchas ideas falsas", escribe refiriéndose a los mitos acerca de la técnica poco avanzada y la copia sistemática de los

Resumen/*El programa espacial tripulado de China*

- China venía trabajando desde 1992 por llevar al espacio sus propias naves tripuladas. No sólo ha construido las cápsulas *Shenzhou*; ha puesto al día sus cohetes lanzadores, edificado nuevas instalaciones para vuelos espaciales y entrenado un cuadro de astronautas.
- Aunque recuerde a las Soyuz rusas, la astronave *Shenzhou* es mayor y, en algunos aspectos, superior técnicamente.
- El gobierno chino espera que su programa espacial tripulado realce la categoría mundial del país y estimule su industria aeronáutica.



WANG JIANMIN *Xinhua/Reuters*

2. LA *Shenzhou 2* despegó la noche del 10 de enero de 2001; se trató de un vuelo de prueba no tripulado. El cohete en dos etapas Chang Zheng 2F consigue un empuje adicional merced a cuatro motores auxiliares adosados a su pie.

diseños extranjeros por parte de los chinos. "Reflejan la idea que los occidentales se hacen acerca de una supuesta incapacidad china de dominar esta técnica. Creo que es más útil que consideremos el modo en que los chinos han ido sacando adelante su programa: lenta y pacientemente, con esmero y disciplina, tomando las decisiones con cuidado, imitando de todos, pero en medida limitada."

La mayoría de los expertos concuerdan con este punto de vista. Al parecer, los chinos quisieron adquirir una Soyuz en perfectas condiciones de utilización para estudiarla, pero los rusos pusieron un precio tan alto que el trato no llegó a cerrarse. Compraron una nave, pero desprovista de muchos sistemas clave. Puede también que se hicieran en su momento con al menos una cápsula Soyuz sin tripulación, estrellada en su territorio al comienzo de la era espacial.

El diseño trimodular de la *Shenzhou* obedece a una distribución lógica, concebida tanto por estadounidenses como por soviéticos hace más de 40 años. La *Shenzhou* se parece más a una Soyuz de hoy que a los primitivos modelos de Soyuz y Apolo. Aunque el módulo de mando presente ciertas semejanzas con la cápsula de reentrada de una Soyuz, los otros módulos son muy distintos de sus equivalentes norteamericanos y rusos. El de servicio tiene cuatro motores principales, mientras que el de las Apolo lleva sólo uno y las Soyuz cuentan con un motor principal y uno de reserva. Los grandes dispositivos solares generan varias veces más energía eléctrica que el sistema ruso. A diferencia de las Soyuz, el módulo orbital chino dispone de unos paneles solares y un sistema de control de vuelo propios, gracias a los cuales aún sirve como minilaboratorio no tripulado en vuelo libre mucho después de que el módulo de reentrada haya devuelto los tripulantes a la Tierra.

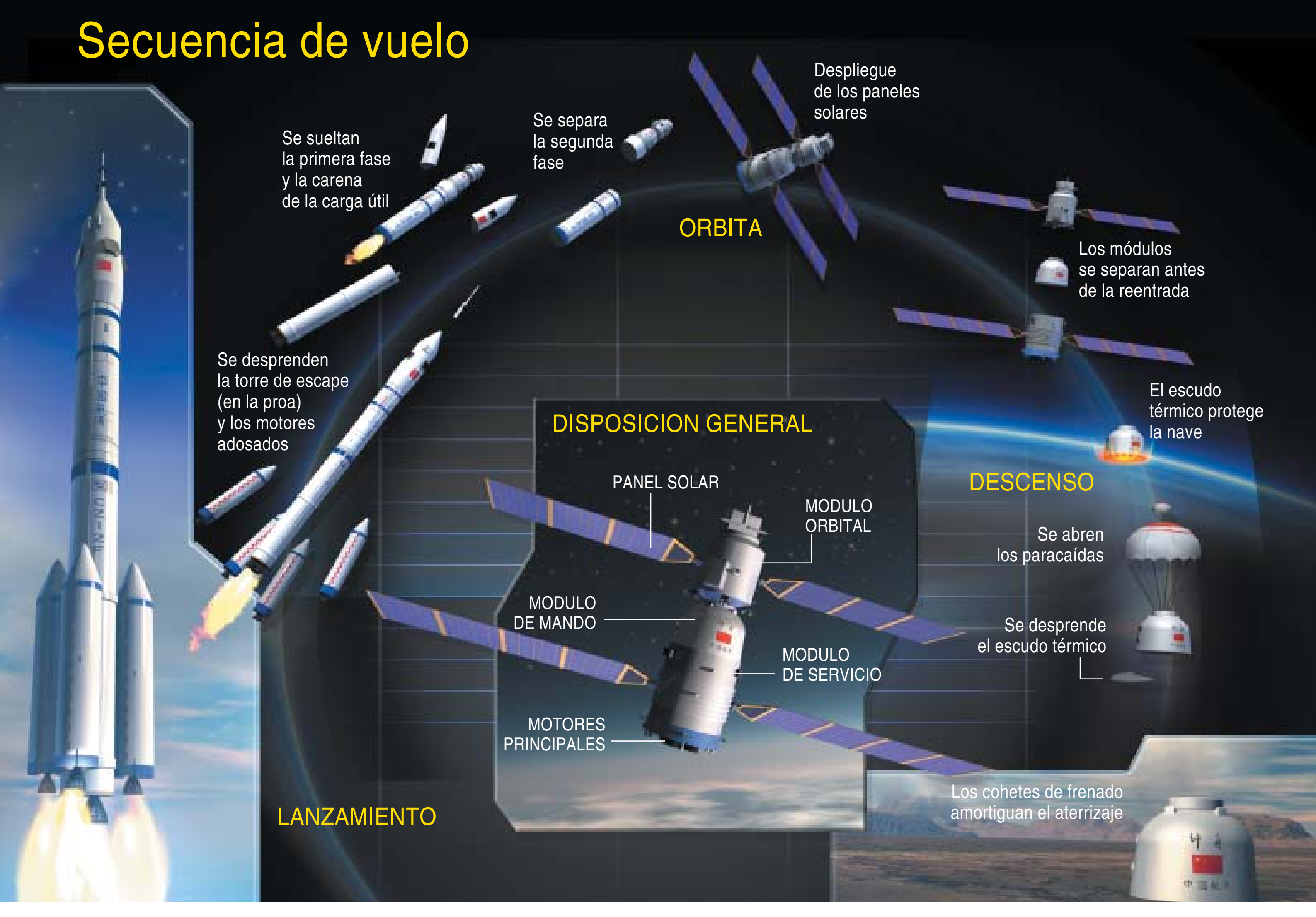
Los trajes presurizados que protegen a los astronautas en caso de una fuga de aire en la cabina durante el vuelo son, en cambio, un ejemplo claro de pura imitación por parte de los chinos. Los rusos introdujeron ese traje de supervivencia (llamado Sokol) en 1972 a raíz de que tres astronautas murieran a causa de una despresurización accidental de la cabina durante el regreso a la Tierra. (Para los paseos espaciales se emplean trajes mucho más perfeccionados.) Los chinos necesitaban un traje para las mismas funciones, por lo que tras conseguir muestras del diseño del Sokol, lo copiaron con exactitud, puntada a puntada, hasta los colores.

Los chinos no han hecho un secreto de tales trasvases de técnica. Un artículo sobre sus planes espaciales aparecido en 2002 en la revista *Liaowang* de la agencia de noticias Xinhua afirmaba: "Después de que China y Rusia firmaran en 1996 un acuerdo de cooperación espacial, ambos países acometieron una muy fructífera cooperación en lo tocante a sistemas de acoplamiento, modelos de naves espaciales, control de vuelo, medios de supervivencia y otras facetas de los vuelos tripulados. La experiencia de Rusia en el desarrollo de la técnica espacial es de importancia trascendental para alumbrar el camino de China".

Dice mucho la mención de los sistemas de acoplamiento. A lo largo de los años, Rusia y EE.UU. han empleado diferentes sistemas de acoplamiento para enlazar astronaves en órbita. Fotografías de la *Shenzhou* indican que los chinos han elegido una variante rusa, APAS-89. Consiste en un túnel presurizado de 80 centímetros de diámetro, rodeado de pétalos metálicos que permiten trabarse a dos unidades que presenten el mismo diseño. APAS-89, concebido para la estación soviética Mir, se emplea ahora para que las lanzaderas de la NASA atraquen en la Estación Espacial Internacional (EEI). Aunque China piensa en el acoplo de su astronave con una futura pequeña estación espacial propia, la elección de APAS-89 le permitiría conectarse tanto a las lanzaderas como a la EEI.

La construcción del lanzador

El desarrollo del lanzador de la *Shenzhou* ilustra asimismo la estrategia china. Deriva de antiguos modelos empleados en lanzamientos científicos y comerciales, pero con algunas mejoras muy concre-



3. LA PRIMERA MISION TRIPULADA CHINA ha seguido la misma secuencia que los cuatro vuelos de prueba sin tripulación anteriores. Mientras se eleva el cohete se desprenden los motores auxiliares, la torre de escape, la primera fase y la carena. Ya en órbita, la segunda fase del cohete se suelta de la astronave y ésta despliega los paneles solares. Antes de la reentrada se separan los módulos: el orbital se queda en el espacio, el de servicio se abrasa en la atmósfera y el de mando devuelve al tripulante a la Tierra; el aterrizaje se suaviza con paracaídas y cohetes de frenado.

ALFRED T. KAMAJIAN

tas. La fiabilidad del cohete portador *Chang Zheng 2F*, según Liu Zhusheng, su proyectista jefe, se tasa en un 97 por ciento; es decir, se espera que falle sólo en tres de cada 100 lanzamientos. (La fiabilidad nominal del cohete *Chang Zheng* no modificado es del 91 por ciento.) Además, la *Shenzhou* puede separarse de su portador en caso de lanzamiento catastrófico. En enero pasado, hablando a periodistas de la agencia Xinhua, Liu describió un nuevo sistema de diagnóstico de averías ideado para controlar el estado del cohete y, de ser necesario, activar los mecanismos de reserva o iniciar el escape de la astronave. Declaró que el sistema de escape ofrece a la tripulación una probabilidad de salvarse del 99,7 por ciento.

El dispositivo de escape de la *Shenzhou* se basa en el sistema de "cohete tractor", concebido a principios de los años sesenta para los vuelos del programa Mercurio de la NASA; luego lo adoptarían los diseñadores de las naves Apolo y Soyuz. Un grupo de cohetes de combustible sólido, montados en una torre en la proa de la *Shenzhou*, separa a ésta del cohete portador en caso de desastre en el lanzamiento; al suelo vuelve en paracaídas. Esos cohetes están listos para encenderse desde 15 minutos antes del despegue hasta 160 segundos después (momento en que la nave se halla a 110 kilómetros de altitud).

En una entrevista para el *Diario del Pueblo*, diario oficial del partido comunista chino, Huang Chunping, responsable del lanzador, mostró al periodista una maqueta que exhibía cuatro aletas sobre el carenado que rodea a la *Shenzhou* durante el despegue. Las aletas, parecidas a celosías, se necesitan para mantener la estabilidad de la nave si ha de escapar durante el lanzamiento. "Es ésta la parte más difícil del sistema de escape", explicaba. "Una vez quisimos consultar a los expertos rusos al respecto, pero fijaron un precio de 10 millones de dólares. Al final, resolvimos solos el problema." La mayoría de los sistemas de la *Shenzhou* se atienen a esta pauta de estudiar lo ya hecho

por otros, pero recurrir a los propios recursos a la hora de diseñar los equipos que finalmente equiparán las naves.

¿Astronautas o *taikonautas*?

No obstante, China sí recibió ayuda rusa para el entrenamiento de los astronautas. En el marco del acuerdo de cooperación de 1996 entre ambos países, dos pilotos militares chinos, Wu Jie y Li Qinglong, siguieron cursos en el Centro Ruso de Entrenamiento de Cosmonautas de la Ciudad de las Estrellas, en las afueras de Moscú. Según se sabe, ahora dirigen ambos el programa de preparación de los aspirantes chinos. Más tarde se seleccionaron otros doce pilotos para que se uniesen a ellos y constituyeran el primer grupo de astronautas chinos.

Todos los astronautas chinos son jóvenes pilotos de reactor, con educación universitaria y más de 1000 horas de experiencia en vuelo. Como la *Shenzhou*, al igual que la Soyuz, tiene un espacio de cabina limitado, la baja estatura es un requisito: ninguno llega a los 1,70 metros y a los 65 kilos. Aún se discute el nombre que se dará a los astronautas chinos. Un entusiasta chino del espacio acuñó el término *taikonauta*, del chino *tai kong*, o "espacio exterior". El gobierno y la prensa prefieren *yuhangyuan*, cuya traducción aproximada es "navegante del espacio".

Para las misiones *Shenzhou*, China mejoró sus instalaciones de investigación y entrenamiento. El nuevo Centro Espacial de la Ciudad Aeroespacial, a las afueras de Pekín, alberga cámaras de presurización, simuladores de vehículos espaciales, una centrífuga y una torre de impactos en el aterrizaje, junto con aulas e instalaciones médicas para astronautas. Allí se halla también el mando de la misión *Shenzhou*. Además, el nuevo Centro de Investigaciones y Ensayos de Tecnología Espacial en Tangjialing, al noroeste de Pekín, dispone de salas de montaje de astronaves, cámaras de entorno espacial (entre ellas una cámara de vacío que es la quinta en tamaño del mundo) e instalaciones para ensayos de vibraciones.

China posee, además, cuatro buques oceánicos para el seguimiento de misiles y astronaves. Esos barcos Yuan Wang ("Vista Larga") están desplegados en el océano Pacífico, donde observan ensayos de misiles militares, y en el Indico, para gobernar las maniobras de los satélites en órbita geosíncrona. En apoyo de los vuelos *Shenzhou* se los enviará al Indico, al sur del Atlántico y al Pacífico Sur. Los rusos disponían de una flota similar, pero la desguazaron en los años noventa por restricciones presupuestarias. China no compró esos barcos, sino que construyó los suyos.

Como algunas de las operaciones de control desde el suelo durante el regreso a la Tierra de la *Shenzhou* deben efectuarse mientras el ingenio se halla sobre el Atlántico Sur, en 2000 China acordó con Namibia edificar una estación de seguimiento en este país, cerca de la ciudad de Swakopmund. La construcción se inició a principios de 2001 y se terminó a finales de ese mismo año. Cinco personas ocupan permanentemente la instalación; el personal aumenta a veinte durante las misiones. El emplazamiento se encuentra bajo la trayectoria de reentrada de la *Shenzhou*, y como la inclinación de la órbita de la nave es diferente de la de la EEI, para seguir los vuelos de retorno desde ésta no podría emplearse la base de Namibia. Parece, por tanto, que pese a la compatibilidad del mecanismo de acoplamiento de la *Shenzhou* los chinos no se interesan por visitar la Estación a corto plazo.

Los objetivos chinos

El primer vuelo de prueba no tripulado de la *Shenzhou* suscitó una explosión de orgullo nacional.

El autor

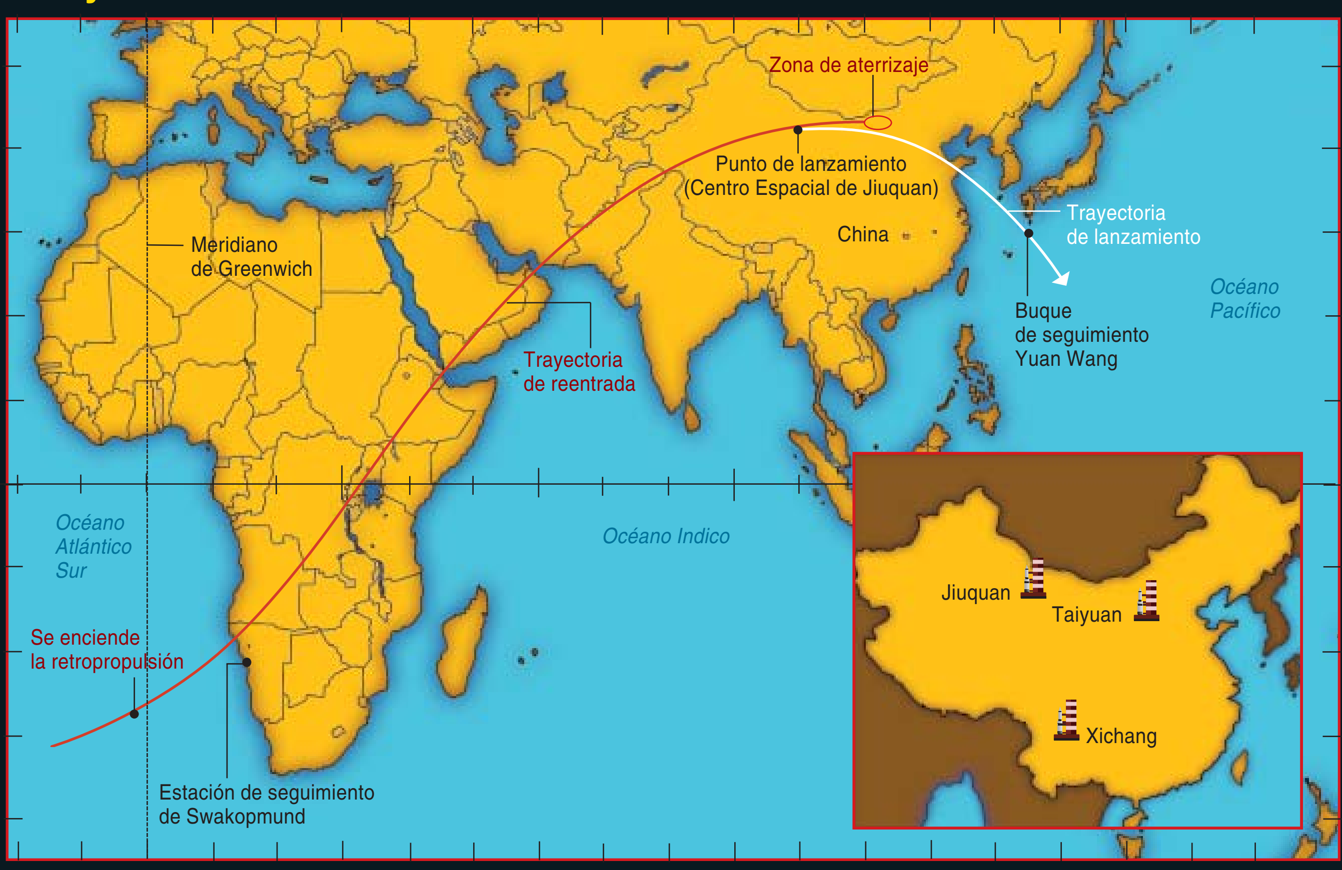
JAMES OBERG pasó 22 años en el Control de Misiones de la NASA, en Houston; se especializó en las citas orbitales de la lanzadera espacial. Hoy es consultor, conferenciante y escritor, con docena de libros e incontables artículos sobre los programas espaciales estadounidenses y rusos en su haber.



4. LOS EQUIPOS DE RESCATE se acercan el módulo de mando de la *Shenzhou 3* tras su aterrizaje en Mongolia interior el primero de abril de 2002. La nave, no tripulada, había pasado una semana en órbita.

GETTY/AFP

Trayectoria de lanzamiento



5. TRAS EL DESPEGUE desde el Centro Espacial de Jiuquan, la *Shenzhou* asciende sobre el océano Pacífico, desde donde la sigue uno de los barcos Yuan Wang ("Vista Larga"). Para regresar a la Tierra enciende un motor de frenado sobre el Atlántico Sur. La retropropulsión es observada por una estación de seguimiento situada cerca de Swakopmund, en Namibia. La zona de aterrizaje se encuentra a unos 500 kilómetros al este de Jiuquan, el mayor de los tres centros de lanzamientos espaciales de que dispone China (*recuadro*).

NINA FINKEL

"¡Lanzamiento histórico estremece el mundo!", tronó el *Diario del Pueblo*. Pero para justificar los gastos del programa *Shenzhou* —según el gobierno, 19.000 millones de yuanes, más de 2000 millones de euros, hasta ahora—, China espera algo más que titulares complacientes. Prevé el gobierno que un programa de vuelos espaciales tripulados reforzará el prestigio mundial de China y la reputación de sus exportaciones de técnicas avanzadas, y brindará así al país un mayor peso diplomático y comercial.

Además, China considera que la técnica espacial es esencial para lograr enseguida la paridad con los países occidentales y Japón. Un libro blanco, publicado en 2000 por la Oficina de Información del Consejo de Estado, declaraba que la industria espacial es "parte integrante de la estrategia del estado en materia de desarrollo global". Conforme a un artículo del número de junio de 2000 de *Xiandai Bingqi*, revista mensual de un instituto tecnológico militar, el programa de vuelos espaciales tripulados "elevará los niveles en áreas tales como la informática, los materiales espaciales, las técnicas de fabricación, los equipos electrónicos o la integración y ensayo de sistemas". Señala también la revista que la experiencia ganada al desarrollar la navegación, la propulsión, los sistemas de supervivencia y otros subsistemas de las astronaves podría aplicarse a "proyectos de uso dual militar y civil".

Lo que China quiere es levantar una impresionante y autónoma capacidad espacial sobre unos fundamentos técnicos restringidos. En vez de desarrollar una amplia variedad de técnicas aeroespaciales, como EE.UU., se centrará en áreas específicas donde pueda igualar y luego superar los logros de los otros países. En un artículo aparecido en abril de 2000 en el *Diario del Pueblo*, Luan Enjie, director de la Agencia Aeroespacial china, exponía: "Con unos recursos económicos limitados y unos cimientos industriales y técnicos débiles, carecemos de la fuerza necesaria para alcanzar y rebasar los niveles a que se ha lle-

gado en cada campo de la técnica aeroespacial".

Aunque China dista aún de poner en peligro la supremacía espacial estadounidense, quizá se proponga unos objetivos más viables. Si ha empezado una nueva carrera espacial, será por el segundo puesto. El programa espacial ruso se esfumó en los años noventa; lo que queda se mantiene sólo gracias a abultadas ventas a clientes occidentales. Con un producto interior bruto y un presupuesto del estado que quintuplican los rusos, China puede permitirse inversiones mayores que el antiguo rival espacial de Estados Unidos. Pero los chinos no despilfarran. Los 2500 millones de euros que al parecer han gastado en el proyecto *Shenzhou* durante el último decenio suman poco más que lo que dedica a la lanzadera espacial la NASA cada año.

El floreciente programa espacial chino ya empieza a eclipsar al de la Agencia Espacial Europea (AEE), que nunca ha puesto astronautas en órbita, pero ocupa el primer lugar mundial en lanzamiento de satélites comerciales no tripulados. Los países que componen la AEE van perdiendo su entusiasmo; la investigación espacial lo paga con unos presupuestos más cortos. Brian Harvey afirma que China podría igualar el número de lanzamientos anuales de la AEE (unos diez) de aquí en unos diez años. Señala también que "los lanzamientos europeos serán sobre todo comerciales y científicos; China, en cambio, se concentrará en las aplicaciones (satélites meteorológicos y de reconocimiento) y en los vuelos tripulados". En 2001 Roger-Maurice Bonnet, director saliente del programa científico de la AEE, declaraba que los gobiernos europeos debían tomar la decisión política de invertir lo necesario para conservar el segundo puesto de la AEE en la investigación espacial (tras EE.UU.) porque, si no, China desplazaría a los europeos en diez años.

Muchos coinciden en que el empeño chino de rebasar a europeos y rusos no tiene nada de descabellado. "China tiene la voluntad política de seguir adelante con su programa espacial", sostiene Joan Johnson-Freese, antes del Centro de Estudios sobre la Seguridad de Asia y el Pacífico, hoy en el Colegio de Guerra Naval. "[China] es consciente de los beneficios internos y externos que el prestigio en materia espacial reportó a EE.UU. y a la ex Unión Soviética durante los años sesenta, así como de los réditos técnicos, industriales y militares que después impulsarían a Europa a establecer su programa espacial."

Como prueba de su determinación, los dirigentes astronáuticos chinos ya han esbozado qué seguirá a las primeras *Shenzhou* tripuladas. Zhang Qingwei, uno de los responsables del organismo chino a cargo del proyecto, expuso al *Diario del Pueblo* en enero pasado: "[La] cabina orbital [se quedará en el espacio] para que haga de basamento del segundo paso de los vuelos tripulados chinos: valdrá como elemento de acoplamiento entre una astronave y otro vehículo espacial". Se interpreta esta afirmación como señal de que en un futuro próximo una nave *Shenzhou* se acoplará a un módulo orbital que una misión anterior habrá dejado en el espacio.

Estación espacial china

Probada esa capacidad aeroespacial, China podría acoplar una *Shenzhou* a un pequeño laboratorio espacial. El ya citado artículo de 2002 de la revista *Liaouwang* describía el plan de actuación: "Tras su éxito con un vuelo tripulado, China no tardará en lanzar una cápsula experimental que cubra las necesidades de los astronautas durante estancias cortas". En otro lugar se describe esa cápsula como "un laboratorio con breves presencias humanas"; la sucederá por último una estación espacial diseñada para estancias largas. En enero pasado, responsables anónimos ponían en más antecedentes a periodistas de la agencia de noticias Xinhua: "Como paso siguiente, China se ocupará de las técnicas de acoplamientos de naves tripuladas y vehículos espaciales, y lanzará un laboratorio espacial. Tras ello, construirá una estación espacial tripulada para estancias largas, que permitirá acometer a gran escala experimentos científicos espaciales y ensayos de aplicaciones técnicas como contribución al desarrollo pacífico de la humanidad en el espacio."

Philip S. Clark, asesor espacial británico experto en las astronáuticas rusa y china, espera que la agencia espacial china lance un pequeño laboratorio, que pesará de 12 a 14 toneladas. Predice que, en 2006 o 2007, China pondrá en órbita una estación mayor, similar a las rusas Salyut de los años setenta y ochenta. Finalmente, cree Clark, China empezará el ensamblado en órbita de una estructura de 130 toneladas de peso semejante a la Mir rusa.

Además, China ha acelerado su despliegue de satélites no tripulados de comunicaciones, de investigaciones espaciales, de navegación y meteorológicos. Los dirigentes chinos han examinado planes para enviar a la Luna, hacia 2010, pequeños vehículos de exploración teleguiados. Según algunos medios occidentales, China desea también poner astronautas en la Luna, pero esas noticias proceden de fuentes no oficiales y pudieran haberse traducido mal. Una misión lunar tripulada resultaría muchas veces más cara que el proyecto *Shenzhou*.

Según expertos como Harvey, la puesta en órbita de astronautas bastará para que el mundo vea a China con otros ojos: "Se la percibirá como una nación con categoría de superpotencia espacial. Si luego pone en órbita una estación del estilo de la Salyut, impresionará a las naciones vecinas y al mundo en general". Los propósitos de China no son los de Estados Unidos, Rusia o Europa. A juzgar por los equipos ya construidos y la infraestructura disponible, parece claro que en el futuro previsible China pretende seguir su propio camino en el espacio.

Bibliografía complementaria

THREAD OF THE SILKWORM. Iris Chang. Basic Books, 1996.

THE CHINESE SPACE PROGRAM: A MISTERY WITHIN A MAZE. Joan Johnson-Freese. Krieger Publishing Company, 1998.

THE CHINESE SPACE PROGRAMME: FROM CONCEPTION TO FUTURE CAPABILITIES. Brian Harvey. Wiley-Praxis Series in Space Science and Technology. John Wiley & Sons, 1998.

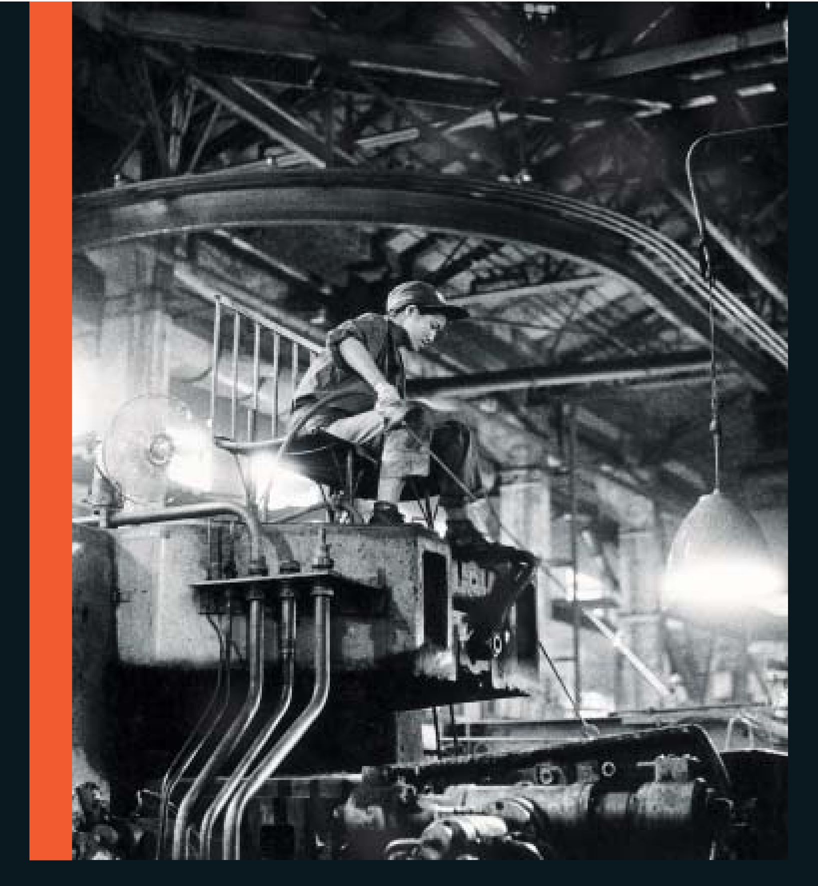
Economía del trabajo infantil

Las campañas contra el trabajo infantil tienen mayores probabilidades de éxito si las medidas legales se articulan con los mecanismos propios del mercado laboral

Kaushik Basu



1. **MINAS DE CARBON** de Dhanbad, en Bihar (India).



2. **FABRICA DE CAMIONES** East Wind, en Shiyan (China).

En los primeros días de la revolución industrial, los inventores solían ser muy claros en cuanto a la finalidad de sus innovaciones. John Wyatt, coinventor de la hiladora de tambor, promocionaba sin rebozo su invento como medio para que las factorías textiles pudieran ahorrar en mano de obra. Según Wyatt, el manejo del artilugio resultaba tan sencillo, que podía prescindirse del personal especializado en el giro de la rueca. "Un pañero que antes empleaba a un centenar de hiladoras podría despedir a treinta de las mejores y reemplazarlas por otras diez débiles o por niños", escribía en 1741. El invento convenció al Justicia Mayor británico, quien, al otorgar la patente, señaló que "incluso niños de cinco o seis años de edad" podrían operar la máquina.

Alabar una máquina por su capacidad de convertir un niño en obrero pertenece a un pasado lejano. A finales del siglo XIX el empleo de niños estaba en declive en la mayoría de los países industrializados. A escala mundial, sin embargo, el problema subsiste todavía. En el año 2000, según la Organización Internacional del Trabajo (OIT), 186 millones de niños de edades comprendidas entre los 5 y los 14 años —aproximadamente, uno de cada seis— trabajaban de forma ilegal, la mayoría en países en vías de desarrollo. De ellos, 111 millones realizaban trabajos peligrosos: en la minería, en la construcción o en penosas faenas agrícolas, que afectarían a su salud para el resto de su vida. En torno a 8 millones trabajaban como esclavos o soldados o eran obligados a prostituirse.

Tales cifras han de tomarse con cautela. Al evaluar el problema, se incurre tanto en sobrevaloraciones como en subestimaciones, pues la mano de obra infantil resulta notablemente difícil de cuantificar e incluso de definir. En ocasiones, una modesta cantidad de trabajo basta para considerar obrero al niño, con la inflación consiguiente de la estadística. En otras, no se cuentan las niñas que trabajan en casa, lo que supone una reducción importante de los computados; esas tareas suelen realizarse a expensas de la debida escolarización. Pese a tales salvedades, se acepta que las estimaciones de la OIT reflejan bastante bien la realidad.

¿Qué hacer? Las medidas dependerán de las causas que explican el trabajo infantil y de las razones de su persistencia. Merced al interés creciente por el problema en los últimos años, conocemos cada vez mejor su alcance. Un examen minucioso ha puesto en tela de juicio la postura de "tolerancia cero", defendida antaño por muchos ideólogos y políticos. En el último decenio del siglo XX, menudeaban las voces partidarias de prohibir la importación de productos en cuya fabricación se hubiera empleado mano de obra infantil. Se reclamó la intervención de la Organización Mundial de Comercio en la imposición de sanciones a los países que así los explotaran. Tales demandas fueron la consecuencia desdichada de un proteccionismo económico malentendido y, a menudo, interesado. Tras una máscara de preocupación por los niños depauperados, pretendían salvaguardar los puestos de trabajo frente la competencia extranjera.

Nepal nos ofrece un ejemplo de su fracaso, puesto de relieve en un estudio acometido por UNICEF en 1995. En los años noventa, se propuso el boicot mundial contra las alfombras de nudos hechas por niños Muchos fabricantes de alfombras nepalíes adoptaron

una solución sencilla: despedir a la mano de obra infantil. La medida llevó a la prostitución de entre 5000 y 7000 niñas. Una campaña bienintencionada acabó dañando precisamente a quienes trataba de proteger. Con un conocimiento algo más fino de los procesos económicos se hubiera evitado el desastre.

Trabajo duro

En el siglo XIX, del trabajo de los niños se culpaba a la incuria de los padres. La ecuación que relacionaba el trabajo infantil con el abuso de los niños sirvió para justificar acciones legislativas. Se repitió tanto esa tesis, que terminó por suponerse incontrovertible. Pero hoy se tiende a pensar que la causa principal del trabajo de los niños yace en la penuria económica de los padres. Así lo confirman estudios realizados a partir de textos autobiográficos de obreros y grandes conjuntos de datos sobre el comportamiento doméstico en los hogares de los países subdesarrollados. Pocos padres desean poner sus niños a trabajar, a menos que las circunstancias les obliguen a ello.

Un estudio sobre la situación doméstica en Pakistán, correspondiente al año 1991, ponía de relieve la interacción entre causa y efecto. Un mecanismo no siempre obvio. En algunas de las regiones más pobres, las familias con algún patrimonio se mostraban más proclives a enviar los niños a trabajar. A primera vista, tales conclusiones parecían contradecir la hipótesis de la pobreza. Pero en las zonas rurales atrasadas, el mercado de trabajo opera a menudo con ineficacia. Las familias venidas a menos que necesitan aumentar los ingresos poniendo sus niños a trabajar, quizá no encuentren trabajo para ellos. Sólo las familias que poseen algo de tierra pueden obviar el problema, empleando a los niños en sus propios campos. Dado que la posesión de tierras constituye una forma de riqueza, no debe sorprendernos que el trabajo infantil tenga una mayor incidencia en los hogares con ciertos recursos. El mayor bienestar no provoca, pues, el trabajo infantil, sino que refleja la posesión de tierras, que crea mayores posibilidades para el trabajo de los niños.

Traspasado cierto umbral de riqueza, la incidencia del trabajo infantil comienza a decaer. Los patrimonios familiares paquistaníes se pueden dividir en tres categorías: marginales (los que poseen menos de una hectárea de tierra), pequeños (de una a tres hectáreas) y grandes (los que poseen más de tres hectáreas). El porcentaje de niños trabajadores aumentaba al pasar de los hogares marginales a los pequeños, pero disminuía en el caso de las grandes explotaciones. Cuando una familia consigue una riqueza suficiente, tiene menor necesidad de que sus niños trabajen.

La tesis que afirma que el trabajo infantil disminuye con el aumento de la prosperidad concuerda bien con las estadísticas de series temporales globales. En China, por ejemplo, el índice de participación laboral infantil, es decir, el porcentaje de niños de edades comprendidas entre 10 y 14 años que trabajan, ha ido disminuyendo regularmente desde el 48 por ciento en 1950 hasta el 12 por ciento en 1995. El descenso más brusco se produjo en los años ochenta, cuando el país inició un período de vertiginoso crecimiento económico. Algo muy similar ha ocurrido en Vietnam y en la India, países sobre los cuales existen datos más confiables. Por el contrario, en las naciones que han tenido una peor evolución económica el descenso en el trabajo infantil ha sido marginal. Así, en Camboya, la participa-

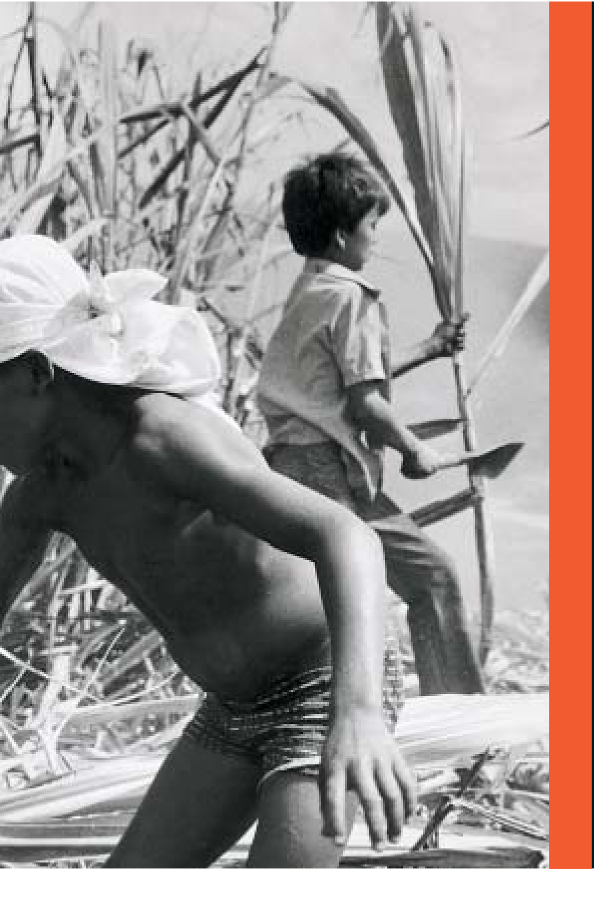


3. CAMPOS DE CAÑA de azúcar. Zona da Mata, Pernambuco (Brasil).

SEBASTIÃO SALGADO *Contact Press Images (fotografía)*

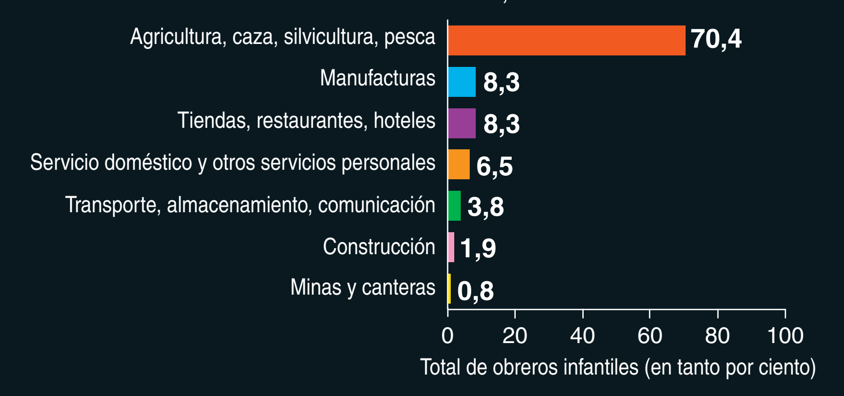
Resumen/*Trabajo infantil*

- El trabajo infantil no decae ni siquiera en sus expresiones más duras: fábricas, minas y burdeles. Se registra sobre todo, aunque no exclusivamente, en países en vías de desarrollo. La prohibición absoluta del empleo de mano de obra infantil en industrias orientadas a la exportación puede llevar los niños a situaciones peores, de laceria y hambre. Corresponde a los políticos tomar medidas más afinadas.
- Según la teoría económica, el trabajo infantil termina por enquistarse. La existencia de niños obreros aumenta la bolsa de trabajadores, mantiene los salarios bajos y ello obliga a las familias a continuar enviando sus hijos a trabajar. Pero la abolición del trabajo infantil puede también generar una retroalimentación positiva. Al reducir la oferta de trabajo, los salarios de los adultos aumentan y se suprime con ello la necesidad de poner los niños a trabajar. Cuando operan tales mecanismos, las prohibiciones selectivas y las ayudas a las familias pueden inclinar la balanza desde la primera hacia la segunda situación.



En general, asociamos el trabajo infantil con la explotación de niños en fábricas o talleres. En realidad, las manufacturas ocupan sólo una pequeña fracción del conjunto de niños que participan en la producción de bienes. La mayoría trabaja en el campo, en explotaciones que van desde granjas familiares hasta plantaciones comerciales. En algunos países, más de la cuarta parte de los trabajadores agrícolas tienen menos de 15 años.





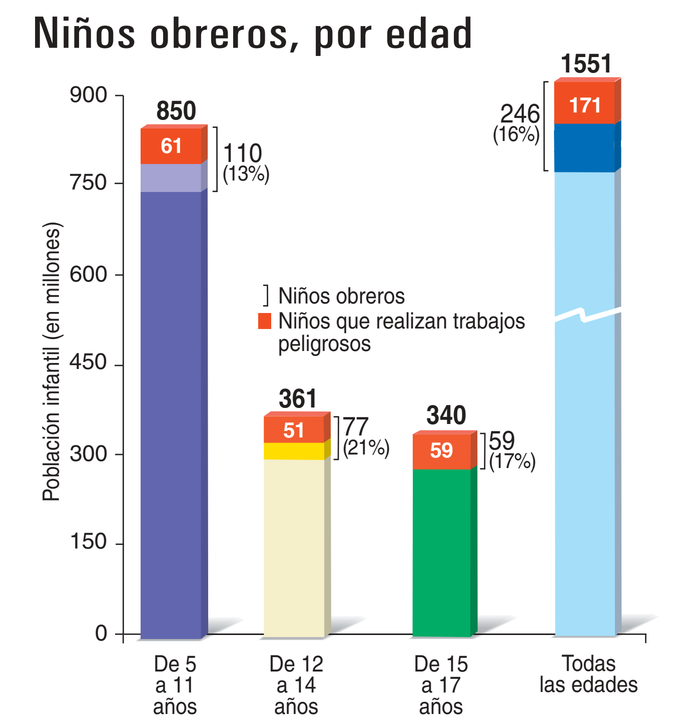
ción laboral infantil sólo descendió desde el 29 por ciento en 1950 hasta el 25 por ciento en 1995.

La pobreza de los padres explica por qué resulta tan difícil erradicar el trabajo infantil. En Gran Bretaña, no dejó de extenderse hasta 1860, pese a la adopción de medidas legislativas y políticas tomadas a lo largo de la primera mitad del siglo XIX. Las leyes imponían un recargo a las empresas que empleaban niños. Aumento de los costos que se tradujo en recortes de la remuneración de los pequeños. Ahora bien, puesto que los niños trabajaban para que sus familias alcanzaran unos ingresos mínimamente aceptables, la reducción de lo que se les pagaba por hora les impulsaba a trabajar más horas. Paradójicamente, las leyes protectoras contribuirían a empeorar la situación. El mismo riesgo se corre ahora con la Ley del Trabajo Infantil promulgada en la India en 1986, que impone multas a las empresas que contratan a niños.

Restaurar el equilibrio

Ante los mismos datos, otros extraen la conclusión opuesta: ni es necesario ni tiene sentido que el gobierno adopte medidas contra el trabajo infantil. Una reacción desproporcionada, sin duda. En determinadas situaciones, una prohibición legal puede contribuir en gran medida a eliminar el trabajo infantil, al tiempo que mejora la situación de padres e hijos. Ello se deduce del análisis de las curvas de oferta y demanda.

Estas curvas muestran que el mercado alcanza un equilibrio, en el cual se ajusta el precio de un producto de suerte que la demanda se iguala con la oferta. En el caso del mercado laboral, el producto corresponde a la cantidad de trabajo realizado y el



4. EL TRABAJO INFANTIL tiene una gran incidencia en el mundo actual. Según datos de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) hay 245,5 millones de obreros menores de 17 años, casi uno de cada seis adolescentes. De ellos, 170,5 millones realizan tareas peligrosas en condiciones insalubres, con jornadas muy largas o en clara explotación (*en rojo*). Todo niño menor de 12 años que trabaje a cambio de una paga se considera obrero. En las edades comprendidas entre 12 y 14 años, sólo se consideran obreros los que trabajan más de 14 horas semanales. A partir de los 15 años pueden realizar cualquier tarea que no sea peligrosa.

FUENTE: ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO (1997) (*arriba*); FUENTE: ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO (2000); DIVISION DE POBLACION DE LAS NACIONES UNIDAS (*abajo*)

Entrando en la curva

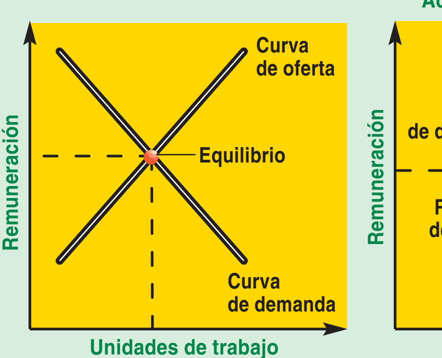
Las curvas de la oferta y la demanda constituyen un instrumento conceptual básico en economía. Las "curvas", que no tienen por qué ser necesariamente curvadas, consisten en dos líneas trazadas en un sistema de coordenadas y representan la disposición de comprar o vender un producto en función de su precio. En condiciones normales, las curvas de oferta y demanda se cortan en un solo punto, que indica el precio del producto en un mercado donde compradores y vendedores operan libremente (*izquierda*).

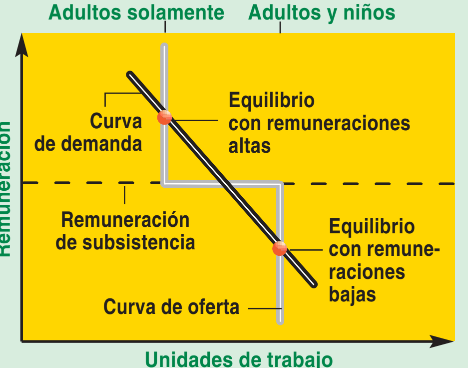
Pero en los mercados laborales con niños potencialmente obreros, las curvas de oferta y demanda presentan equilibrios múltiples: se cortan en más de un punto. En este caso, las familias envían sus niños a trabajar cuando los ingresos de los adultos caen hasta niveles intolerables. Aunque el umbral de lo "intolerable" varía de unas sociedades a otras y de unas familias a otras, en este ejemplo se prescinde de tales matices con la finalidad de mostrar con mayor nitidez los principios básicos de este tipo de mercado. Se supone también que el trabajo de un niño equivale a una cierta fracción del trabajo de un adulto (*derecha*).

Esta curva de forma escalonada permite ver de cuánta oferta laboral dispone el patrono en función de los salarios ofrecidos. Si el salario supera el nivel de subsistencia, las familias no ponen sus hijos a trabajar; cada hogar genera una unidad de trabajo, suministrada por los adultos. Si el salario está por debajo del nivel de subsistencia, los hijos también trabajan y cada hogar genera algo más de una unidad de trabajo, el total suministrado por los adultos y los niños. El comportamiento de los patronos está descrito por la curva de demanda. Las curvas de demanda son descendentes: para que un patrón emplee a muchos trabajadores los salarios deben ser bajos.

Este mercado puede estabilizarse en cualquiera de los dos equilibrios siguientes: salarios altos y trabajadores adultos, o salarios bajos y trabajadores adultos y niños. La forma de las curvas varía en función del grado de complejidad del modelo. Por ejemplo, si se considerase que los niños solamente trabajan para cubrir la diferencia entre los ingresos de sus padres y el nivel de subsistencia, el segmento horizontal de la curva de oferta se convertiría en una curva descendente (un arco de hipérbola, para mayor precisión). Aun así, la posibilidad de equilibrios múltiples seguiría existiendo.

Cuando solamente existe un punto de equilibrio, las medidas legales que puedan aplicarse —prohibición del trabajo infantil— deben luchar contra las tendencias naturales del mercado. Aunque tales medidas tuvieran éxito, lo alcanzarían al precio de un derroche económico que podría desencadenar nuevos problemas sociales. Los equilibrios múltiples evitan estas complicaciones. Si un país se ve atrapado en un equilibrio, una prohibición puede desviarlo hacia otro equilibrio en el que el mercado opere a favor, y no en contra, de la medida política. Desde el punto de vista económico, todos estos equilibrios presentan la misma eficiencia.





EN LOS MANUALES DE ECONOMIA, la curva de oferta laboral asciende en línea recta. Indica que el aumento de los salarios y el número de personas dispuestas a trabajar crecen a la par. La curva de demanda desciende, pues los salarios altos disuaden a los patronos de contratar. Las dos líneas se cortan en un solo punto (*izquierda*). En los países pobres, en cambio, la curva de oferta adquiere forma escalonada y se corta en más de un punto con la curva de demanda (*derecha*). Ello se debe a que los salarios bajos obligan a las familias a enviar sus hijos a trabajar para poder subsistir, aumentando así el número de trabajadores.

NINA FINKEL

precio a la remuneración de la unidad de trabajo. Este determina la voluntad laboral del trabajador (oferta) y la voluntad contractual del patrón (demanda). En el modelo estándar, si los salarios suben, la oferta de trabajo aumenta y la demanda disminuye; si los salarios bajan, ocurre lo contrario. Hay solamente un precio del trabajo, o paga por unidad de trabajo, en el que oferta y demanda se igualan.

Pero algunos mercados se apartan de este ejemplo de manual. Son los que se caracterizan por equilibrios múltiples: existe más de un salario que iguala la demanda con la oferta. Los mercados laborales de los países pobres constituyen un buen ejemplo. Consideremos un país en el que los adultos reciben salarios bajos y los niños, por esa misma razón, entran en el mercado laboral. Supongamos que el trabajo infantil está prohibido por ley y que esa norma se cumple. Las empresas que estaban utilizando mano de obra infantil buscarán adultos para sustituirlos y, al competir en una bolsa de trabajo más reducida, tendrán que pagar salarios más altos. Posiblemente, si los salarios hubieran sido altos desde un principio, los padres no hubieran puesto sus niños a trabajar. Imaginemos, entonces, que la prohibición de trabajo infantil se deroga. Dado que ganan lo suficiente para salir adelante, los padres no necesitan que sus hijos trabajen.

La ley funciona simplemente como un mecanismo para desviar el sistema económico, desde un equilibrio con salarios bajos y niños obligados a trabajar hasta otro equilibrio con salarios elevados y niños escolarizados. Una vez el sistema económico queda enclavado en el nuevo equilibrio, empleados y patronos se encargan, por su propio interés, de mantenerlo, incluso en situación de recesión económica. La

El autor

KAUSHIK BASU es profesor de economía, director del Programa de Desarrollo Económico Comparado y titular de la cátedra Carl Marks de Estudios Internacionales de la Universidad de Cornell. Ha escrito extensamente sobre economía del desarrollo, economía del bienestar, teoría de juegos y organización industrial. Cuando terminó la enseñanza secundaria en Calcuta, Basu quería abandonar los estudios, pero su padre se empeñaba en que cursara la carrera de físicas. Finalmente, llegaron a una situación de compromiso: estudiaría economía. Aunque al principio le pareció árida y sin atractivo, cuando asistió a las clases de la Escuela de Economía de Londres quedó seducido por el volátil razonamiento deductivo en que se fundaba y decidió seguir esta carrera.

ley actúa, pues, de una vez por todas. En un artículo que el autor escribió con Pham Hoang Van, de la Universidad de Missouri, denominábamos a esas acciones "intervenciones legislativas benignas", para distinguirlas de las intervenciones legislativas rutinarias, que exigen vigilancia continua y amenaza sostenida de penalización.

En los modelos teóricos, los economistas a menudo consideran que el cambio de un equilibrio a otro se produce sin costo. Obviamente, la realidad es otra. Para afrontar la nueva situación, las empresas que venían empleando mano de obra infantil pueden verse obligadas a invertir en maquinaria o bienes de equipo. En el país habrá que construir más escuelas. Sin embargo, se trata de modelos que han recibido el respaldo de la historia, según se desprende, entre otros, del estudio del papel desempeñado por la legislación norteamericana en la reducción del trabajo infantil en las postrimerías del siglo XIX.

Atrapados

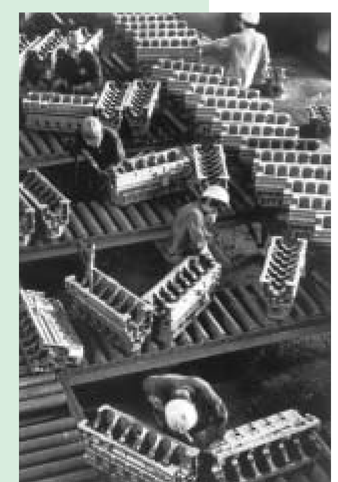
Los equilibrios múltiples se producen también en otras circunstancias. Una familia que envíe sus niños a trabajar debe afrontar cierta mala reputación. El grado de afrenta es inversamente proporcional a la cantidad de trabajo infantil que exista en esa sociedad: si el trabajo infantil está muy extendido, la población estará habituada a ello y el estigma social resultará menor.

Para ver el modo en que tal hecho puede conducir a equilibrios múltiples, supongamos que sólo trabajan unos cuantos niños. Los padres que envían a trabajar a los suyos deben afrontar la desaprobación de amigos y vecinos. Por consiguiente, sólo los padres muy necesitados envían sus hijos a trabajar. Pocos niños, pues, trabajan. La sociedad está en equilibrio porque la baja persistencia del trabajo infantil se refuerza a sí misma. En la situación inversa, supongamos que muchos niños trabajan. En este caso el estigma asociado al trabajo infantil es menor y, por lo tanto, más padres envían sus hijos al tajo. La sociedad vuelve a estar en equilibrio. Cualquier situación intermedia entre estos dos niveles desestabiliza la sociedad, que deberá

Más de una forma de gestionar el mercado

La noción de equilibrios múltiples también se puede aplicar a situaciones que no tienen relación con el trabajo infantil. Actualmente, la mayoría de los economistas acepta que los sistemas económicos regidos por el mercado superan en eficiencia a los que obedecen a un control central. La acción de los individuos en busca de su interés particular tiene un efecto beneficioso para el conjunto de la sociedad. Pero tampoco podemos propasarnos y creer que la racionalidad individual constituye la única cualidad necesaria para alcanzar un cierto fin social. Así lo ponen de manifiesto los modelos económicos que presentan equilibrios múltiples.

Recordemos la controversia que tuvo lugar en el siglo XIX al respecto de la ley que limitaba el número de horas de la jornada laboral. El típico argumento *laissez-faire* sostenía que tal intervención constituía una injerencia paternalista, pues no había razón para prohibir una jornada de 14 horas si el obrero estaba dispuesto a trabajarlas y el patrono a pagar por ellas.



FUNDICION SHI-YEN. Provincia de Hubei (China).

SEBASTIÃO SALGADO *Contact Press Images*

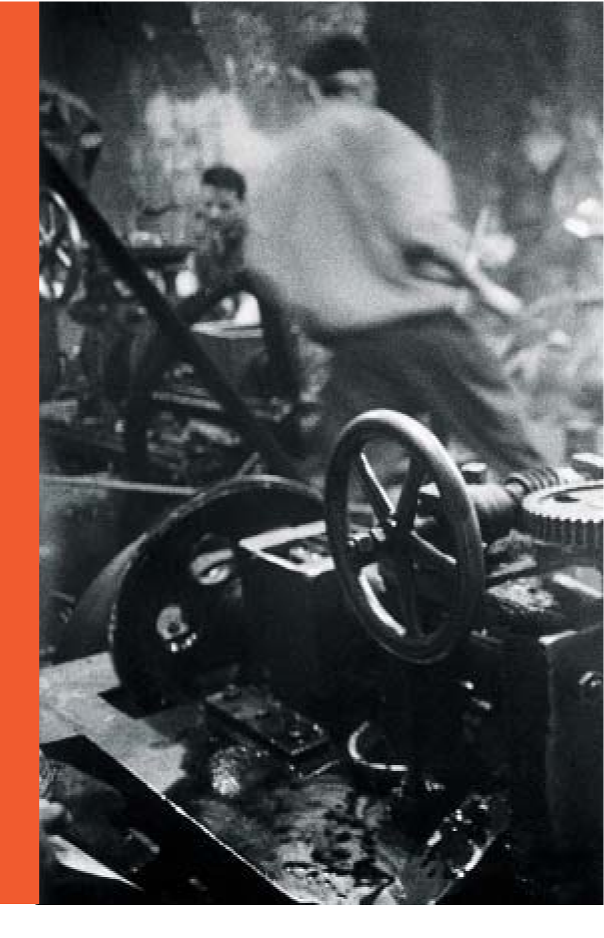
Para comprender mejor la situación, analicemos con detalle la oferta y la demanda. Supongamos un mercado con una renta de supervivencia de 12 euros diarios, formado por cien obreros y unos cuantos empresarios. Cada uno de los obreros preferiría trabajar ocho horas diarias en tanto pudiera ganar al menos 12 euros. Solamente trabajaría más tiempo si eso fuera necesario para alcanzar los ingresos de subsistencia. Si la remuneración del trabajo fuese de 2 euros por hora, los obreros pasarían 8 horas en el tajo y ganarían 16 euros. La oferta laboral total sería de 800 horas-trabajador al día. Si el salario fuese de 1 euro por hora, los obreros tendrían que esforzarse durante 12 horas para conseguir su salario de subsistencia. En este caso, la oferta total resultaría en 1200 horas-trabajador al día.

Los patronos, por su parte, estarían más dispuestos a contratar obreros si los salarios fuesen bajos. Supongamos que para un sueldo de 1 euro por hora la demanda de mano de obra fuese de 1200 horas-trabajador al día, mientras que a 2 euros la hora, tal demanda resultase en 800 horas-trabajador.

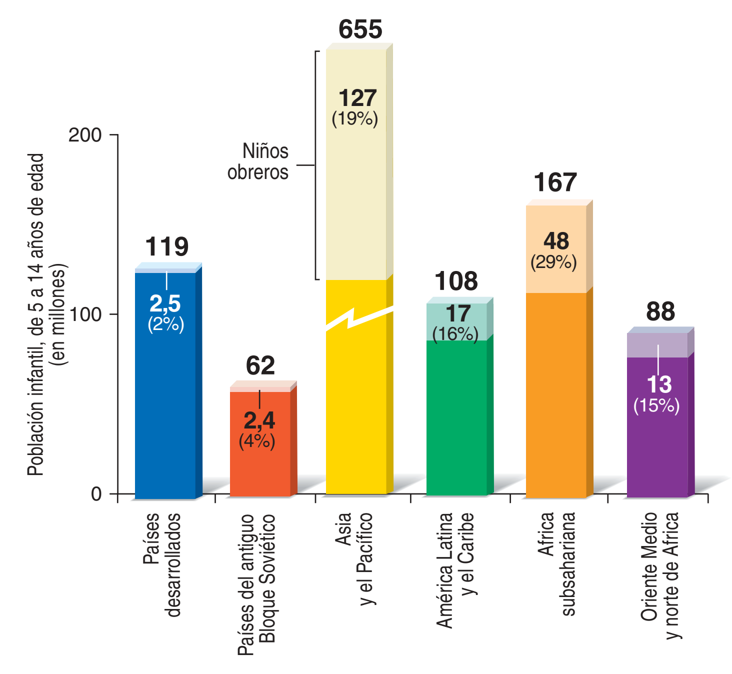
En este supuesto, los salarios de 1 euro por hora y de 2 euros por hora corresponden a valores de equilibrio: en esos puntos la demanda iguala la oferta. Si el sistema económico estuviera enclavado en el equilibrio de 1 euro por hora, cada trabajador se hallaría dispuesto a trabajar 12 horas diarias. Sin embargo, una ley que limitara la jornada laboral a 8 horas estaría justificada en interés de los trabajadores. Se trataría en este caso de una intervención benigna. Obviamente, el equilibrio de salarios altos desfavorece los patronos. En cada equilibrio hay ganadores y perdedores.

Se cree que más de ocho millones de niños están atrapados por deudas, el servicio militar obligatorio, esclavitud sexual u otras situaciones abusivas. De estos, alrededor de medio millón se encuentran en países desarrollados, incluidos EE.UU. y algunos miembros de la Unión Europea. Tales datos concuerdan con las cifras estimadas de tráfico ilegal de niños, que asciende a 1,2 millones.





Niños obreros, por región



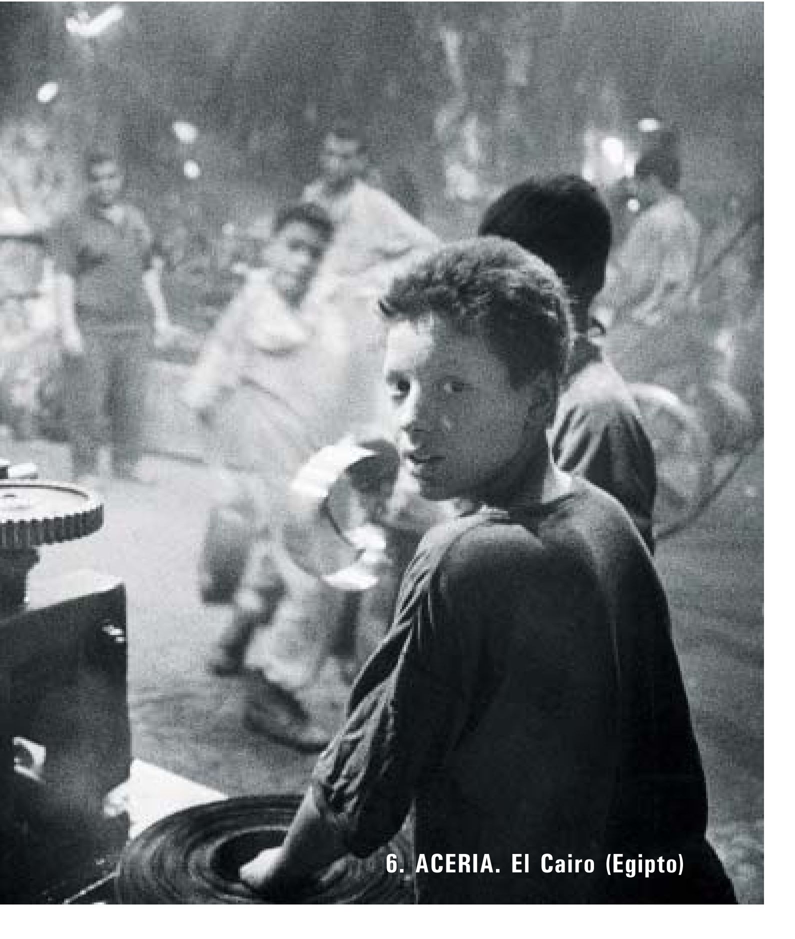
5. EN TERMINOS ABSOLUTOS, la mayoría de los niños obreros vive en los países en vías de desarrollo de Asia meridional y oriental. En términos relativos, la incidencia del trabajo infantil es máxima en Africa subsahariana, donde se estima que un 29 por ciento de los niños de 5 a 14 años trabajan para ganarse el pan. El trabajo infantil está menos extendido en el mundo desarrollado, si bien no ha desaparecido por completo. (Nota técnica: Las cifras de población infantil total difieren ligeramente de las de la figura 4, debido a revisiones de las estimaciones de población.)

atravesar un período de cambios hasta alcanzar una situación de equilibrio.

Existe otro tipo de equilibrio, asociado al círculo vicioso de la pobreza. Las personas que pasaron su infancia trabajando llegan a la edad adulta con un bajo nivel de escolarización. Como consecuencia, tienden a ser más pobres y probablemente tengan que poner sus hijos a trabajar. Así, las familias pueden verse atrapadas en una situación perpetua de trabajo infantil. Recíprocamente, podrían encontrarse en un círculo virtuoso de riqueza creciente. Esta teoría, sometida a ensayo, ha recibido el respaldo de un gran conjunto de datos, recabados entre hogares brasileños. La probabilidad de enviar los hijos a trabajar resultó mayor en el caso de los progenitores que habían sido niños obreros.

Cabe señalar que esta tendencia no mostró dependencia de los ingresos de los adultos. Quienes habían trabajado de niños tenían mayor probabilidad de enviar sus hijos a trabajar que las personas de iguales ingresos que no lo habían hecho. Ello refleja que los padres que han sido niños obreros tienden a infravalorar la escolarización de sus hijos. Por lo tanto, si bien el principal, la economía no es el único factor que influye en el trabajo infantil.

Por motivos económicos o sociales, la incidencia del trabajo infantil tiende a enquistarse en sí misma. Cierto es que esta persistencia contribuye a perpetuar un número elevado de niños obreros, lo cual genera pesimismo. Sin embargo, también se encarga de estabilizar la situación una vez eliminado el trabajo infantil, operando a favor de los reformistas. La multiplicidad de equilibrios guarda una estrecha relación con el fenómeno de la "basculación", en virtud del cual


6. ACERIA. El Cairo (Egipto)

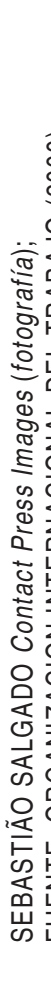
basta un cambio sutil para engendrar un movimiento brusco. A la manera de una jarra que inclinamos lentamente hasta volcarla, una pequeña modificación puede provocar un cambio drástico en el mercado. Pensemos en una sociedad, atrapada en un equilibrio donde el trabajo infantil abunda, que posee, empero, equilibrios múltiples. Supongamos ahora que, por ley o por un cambio progresivo de las pautas sociales, el trabajo infantil decae poco a poco. Alcanzado cierto punto, el mercado laboral entra en la zona de atracción del otro tipo de equilibrio. El trabajo infantil merma en picado, sin necesidad de nuevas intervenciones. En EE.UU., a pesar de más de 70 años de esfuerzos gubernamentales para prohibirlo, el trabajo infantil se mantuvo generalizado hasta 1900. Mas, en cuanto comenzó a decrecer, el declive procedió con suma rapidez. En 1930 estaba erradicado.

Paso a paso

La conveniencia, o no, de una determinada política depende de sus objetivos últimos. Si el control del trabajo infantil no constituye un fin en sí mismo, sino un instrumento para permitir que los niños crezcan y lleguen a ser individuos productivos y felices, la evaluación de las medidas políticas deberá realizarse de acuerdo con esta vara de medir. Limitarse a comprobar que los niños dejan de trabajar se convierte en un criterio miope e insuficiente. De hecho, en las regiones más pobres, quizá conviniera que la sociedad permitiera que los niños trabajaran unas horas al día. En Perú y en Brasil el trabajo de los niños constituye, con frecuencia, la única fuente de financiación para sus estudios o el de sus hermanos, formación que les saca de la miseria a ellos y a su progenie. Tales hallazgos plantean espinosas cuestiones morales, pero todo juicio debe tomar en consideración la realidad en medio de la cual nos desenvolvemos.

Muchos expertos han aducido que la acción legislativa no resulta el mejor método para controlar el trabajo infantil. Una intervención de este tipo solamente puede lograr los efectos deseados en el caso de existir equilibrios múltiples. En general, la acción política debería estar encaminada a mejorar las condiciones laborales y los ingresos de los trabajadores adultos, con el fin de difuminar las circunstancias que alientan el envío de los niños al trabajo. Por ejemplo, cuando los ingresos de los padres fluctúan debido a reveses económicos, éstos pueden verse obligados a sacar a sus hijos de la escuela. Aunque los chicos retornen a ella más adelante, les resultará difícil ponerse al día y con frecuencia abandonarán los estudios definitivamente. Si los padres tuvieran a su alcance préstamos y seguros, podrían superar los períodos de crisis sin necesidad de recurrir al trabajo de sus hijos. Pequeños incentivos, como proporcionar a los niños la comida del mediodía o facilitar subsidios a los padres con hijos escolarizados, pueden cortar en seco el trabajo infantil. Así se ha demostrado en Brasil y Bangladesh.

Cuando se afronta el problema de los niños obreros resulta fácil caer en la trampa de la autocomplacencia, que lo deja todo en manos del mercado, o en la hipocresía pseudomoral, que pretende eliminarlo de un plumazo sin preocuparse realmente por el bienestar de los niños. Disponemos de suficiente información para acabar con el trabajo infantil, si bien se requieren grandes dosis de prudencia y una cuidadosa articulación de las intervenciones políticas.



Bibliografía complementaria

THE ECONOMICS OF CHILD LABOR. Kaushik Basu y Pham Hoang Van en *American Economic Review*, vol. 88, n.º 3, páginas 412-427: junio de 1998.

CHILD LABOR: CAUSE, CONSEQUENCE AND CURE WITH REMARKS ON INTERNATIONAL LABOR STANDARDS. Kaushik Basu en *Journal of Economic Literature*, vol. 37, páginas 1083-1119; septiembre de 1999.

HARD AT WORK IN FACTORIES AND MINES: THE ECONOMICS OF CHILD LABOR DURING THE BRITISH INDUSTRIAL REVOLUTION. Carolyn Tuttle. Westview Press, 1999.

DOES GLOBALIZATION INCREASE CHILD LABOR? EVIDENCE FROM VIETNAM. Eric Edmonds y Nina Pavcnik. NBER Working Paper No. W8760. Enero de 2002.

A SOCIAL STIGMA MODEL OF CHILD LABOR. Luis-Felipe López-Calva en *Estudios Económicos*, vol. 17, n.º 2: julio-diciembre de 2002.

IS THERE A CHILD LABOR TRAP? INTERGENERATIONAL PERSISTENCE OF CHILD LABOR IN BRAZIL. Patrick M. Emerson y André P. Souza en *Economic Development and Cultural Change*, vol. 51, n.º 2, páginas 375-398; Enero de 2003.

Las cerámicas antiguas de la región mexicana de Occidente

Los insectos necrófagos y las máculas minerales ayudan a un antropólogo forense y a un químico a determinar la autenticidad de figurillas elaboradas hace 2000 años

Robert B. Pickering y Ephraim Cuevas

En los catálogos de subastas de Sotheby o de Christie hay siempre listas de figurillas cerámicas de hace 2000 años, procedentes de la región mexicana de Occidente. Muchas de ellas, bellamente realizadas, representan figuras humanas que tocan instrumentos musicales, juegan o practican, parece, ceremonias rituales. Una de estas atractivas figurillas que se encuentre en buen estado de conservación se cotizará a 8000 o más dólares, cantidad suficiente para que un menesteroso saquee, en su desesperación, una tumba o para que se pergeñen falsas antigüedades. Esta delincuencia ha llegado a constituir un grave problema; dificulta los trabajos de los arqueólogos que tratan de conocer las culturas prehispánicas de aquella zona.

El saqueo desenfrenado disminuye la valía de las piezas originales aun cuando éstas caigan al final en manos de un arqueólogo. En cambio, la excavación sistemática le permite al especialista ver las piezas en contexto con otros restos; se garantiza así casi del todo su autenticidad. Sacados de su contexto arqueológico, unos artefactos que representan a antiguas culturas quedan reducidos a poco más que objetos artísticos. Pero tal advertencia no parece importarles gran cosa a quienes se desenvuelven en el mundo del arte. Coleccionistas y marchantes hay que aseguran que con la compraventa de antigüedades están "conservando" las piezas para las generaciones futuras.

Por desgracia, los museos mismos se encuentran atrapados en el dilema: durante más de un siglo han venido aceptando colecciones procedentes del sector privado o patrocinando expediciones arqueológicas con el fin de enriquecer sus catálogos, y como las piezas de las colecciones privadas son de origen incierto, con frecuencia las exponen como meros objetos de bella factura. Ahora bien, si los museos no aceptaran esas colecciones, ¿adónde irían a parar?

La situación se complica aún más por la circulación de falsificaciones. Los saqueadores de tumbas no satisfarán por mucho tiempo todavía al mercado de antigüedades; algunos artesanos desaprensivos, o meramente oportunistas, agravan con su producción de copias el dilema que se le plantea al arqueólogo. Muchas de estas imitaciones se distinguen fácilmente, pero otras son obra de individuos muy habilidosos, de artesanos que leen la literatura profesional, disponen de nutridas bibliotecas y saben de sobra los precios fijados por las casas de subastas. Conocen también la psicología de sus clientes, así como las consejas que corren acerca de cómo se distingue una figurilla antigua de una moderna. ¡Hasta puede que estén creando algunas de esas consejas!

Tan desagradable estado de cosas es la principal motivación de los trabajos descritos en este artículo. No hay mejor manera de explicar su desarrollo que por medio de un relato en primera persona. Como antropólogo forense y hasta hace poco

Los autores

ROBERT B. PICKERING es director adjunto de colecciones y educación en el Centro Histórico Búfalo Bill de Cody, Wyoming. Entre sus investigaciones se incluye la del desarrollo de técnicas no destructivas para determinar la autenticidad de cerámicas antiguas. EPHRAIM CUEVAS, fue investigador químico de profesión, colaboró como voluntario en el Museo de la Naturaleza y de la Ciencia de Denver.



CORTESIA DE R. WICKER/ MUSEO DE LA NATURALEZA Y DE LA CIENCIA DE DENVER

1. LAS FIGURILLAS CERAMICAS del antiguo México occidental retratan el pueblo que vivió en la región hace 2000 años. Lamentablemente, el saqueo de tumbas y la fabricación de hábiles falsificaciones ha supuesto una dificultad añadida, para los arqueólogos, en su comprensión e interpretación del significado de estas estatuas y de las poco conocidas culturas que las produjeron. Los autores han desarrollado un nuevo método para determinar su autenticidad; se basa en el análisis de residuos de insectos necrófilos y negras máculas de mineralizaciones, visibles en la imagen. Aquí se ven dos hombres y una mujer —parte de un círculo mayor de figuras humanas— con vestidos y tocados diferentes. El significado del círculo y los distintos tocados sigue siendo desconocido.

conservador de museo que heredó la responsabilidad de cuidar una colección de cerámicas antiguas, la mayoría donadas por coleccionistas privados, bien sé que algunos de estos objetos son falsificaciones. Casi cada día me pregunto cómo podría resultar útil la colección para los investigadores, teniendo en cuenta los problemas que presenta la documentación de las piezas. Mi colaboración con el coautor de este artículo, Ephraim Cuevas, recientemente fallecido, dio como fruto un nuevo método no destructivo de establecer la autenticidad de las piezas; encierra la promesa de enseñarnos mucho acerca del poco conocido pueblo que hace tantos siglos fabricó esos artefactos.

En el interior de la tumba

En 1995 se me pidió que examinara un pequeño grupo de restos de esqueletos humanos del yacimiento de Huitzilapa, al oeste de Guadalajara, cuya preservación formaba parte de unas obras que había proyectadas. Estaban esparcidos en una tumba, 8 metros por debajo de lo que fue en tiempos el suelo de una casa, o de un edificio semejante a una casa. Se entraba a la tumba a través de ese suelo, por un pozo que conducía a dos cámaras excavadas en la erosionada roca; contenían los restos de cinco adultos y una adolescente, sus adornos personales y algunos enseres funerarios.

Aunque yo estaba allí para examinar los restos humanos, no pude menos de fijarme en algunos de los objetos que había en la tumba. Impresionaban unas figuras humanas de cerámica, de tamaño considerable. Esa parte del oeste de México es conocida por la producción prehispánica de finas figuras huecas que representaban personas, animales y escenas de la vida. En las figuras humanas se ve una variedad de vestidos y tocados; muchas llevan objetos de la vida cotidiana o de los rituales. También están representados caracoles y crustáceos, perros y otros mamíferos. Aquellos antiguos ceramistas crearon además detallados modelos de escenas aldeanas, de casas, de ceremonias y hasta de juegos de pelota. Al correr de los siglos estos temas fueron representándose con distintos estilos de cerámica, que ahora les sirven a los arqueólogos para distinguir entre las diversas culturas que florecieron en la región. Aunque sus estilos han atraído mucho la atención, sobre todo la de los historiadores del arte, aún están poco claros el propósito y el significado de las figuras.

Las figuras de la tumba de Huitzilapa representaban seres humanos, hombres y mujeres; el estilo correspondía a una antigüedad de casi 2000 años. Al haber sido encontradas *in situ*, eran especialmente valiosas: para los arqueólogos, como claves del género de vida de un pueblo antiguo; para los coleccionistas, como antigüedades seguras. Al observar los detalles de cómo se elaboraron, hallé algo mucho más interesante. Examinándolas de cerca, pude ver que en la superficie de cada figurilla había incrustadas unas pequeñas conformaciones ovoidales, de menos de 5 milímetros de lon-

gitud. Unas diminutas líneas perpendiculares al eje mayor de cada "ovoide" lo dividían en segmentos. A los pocos segundos caí en la cuenta de que esas incrustaciones debían de ser los residuos de puparios de insectos (de los envoltorios en que viven las pupas entre las fases larval y adulta).

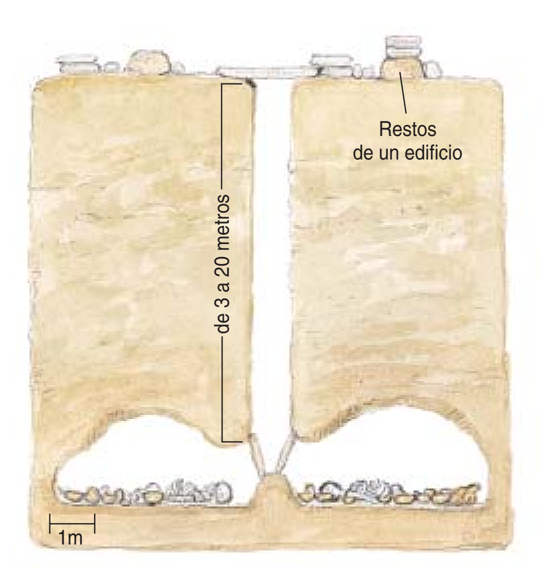
Por mi trabajo de antropólogo forense sabía que los insectos necrófilos dejan a menudo rastros de su presencia en los restos humanos o cerca de ellos. También sabía que tales rastros proporcionaban claves sobre las condiciones en que estuvo la tumba antes y después de que se la cerrara. Mas, con todo, no podía creer que tan delicadas estructuras orgánicas hubiesen sobrevivido casi 2000 años. Mis colegas de México y de los EE.UU. se mostraron muy escépticos respecto a mi interpretación: ninguno de ellos había reconocido ovoides así en un contexto parecido.

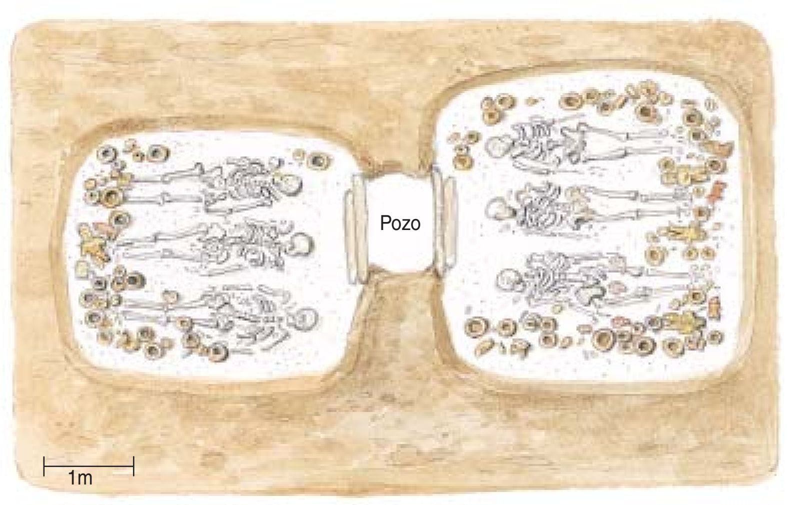
Cuando volví al Museo de la Naturaleza y de la Ciencia de Denver, estudié las figurillas cerámicas de sus colecciones. No tardé mucho en encontrar, adheridos a unas cuantas figurillas, los mismos ovoides. Por entonces recibió el museo la donación de unas vasijas cerámicas de Occidente procedentes de una colección privada. Había entre ellas una gran olla, que se había roto cuando estaba aún en manos privadas. Tenía muchos residuos de puparios, distribuidos por dentro y por fuera según una pauta muy clara: por fuera se hallaban los puparios en varias partes, mientras que por dentro sólo se los veía arriba, en la boca de la vasija. Me dio a entender que la olla estaba casi llena (quizá de líquido) cuando la dejaron en la tumba y que por esa razón las larvas del insecto no se adentraron más. Era una clave para cronometrar las actividades de los insectos: se habían presentado antes de que las ofrendas de comida y bebida se evaporaran o descompusiesen. Tuvo que ocurrir en un lapso de unos días, o a lo sumo unas semanas, no durante meses o años, después de que se sellara la tumba.

La investigación tomó otro cariz cuando Cuevas, químico ya jubilado, expresó su interés en trabajar para mí como voluntario en el departamento de antropología. Emprendimos enseguida la documentación de la presencia de ovoides en las figurillas, amén de otras características. Al químico Cuevas le intrigó la presencia de densas motas negras en las cerámicas. Los arqueólogos conocen desde hace mucho máculas similares, que interpretan como concentraciones de dióxido de manganeso. Aparecen no sólo en las cerámicas, sino sobre diversos materiales hallados en Occidente. Han abundado en la región los seísmos y el volcanismo, que desentierran o depositan minerales. ¿Serían las negras máculas en cuestión depósitos minerales producidos por algún proceso geológico? Examinamos objeto por objeto en busca de todas las estructuras ovoidales y motas negras que pudiera haber en las figurillas y vasijas de la colección mexicana del museo.

Un caso de identificación

Al cabo de un año, dos entomólogos forenses, Neal Haskell, del Colegio de San José, de Indiana, y Robert Hall, de la Universidad de Missouri, confirmaron que las estructuras ovoidales eran los residuos de los puparios de insectos necrófilos. Por desgracia, son demasiado incompletos para que se puedan identificar con precisión las especies que los produjeron. Todos tienen más o menos el mismo tamaño y forma, lo que sugiere que pertenecen a una sola especie o a muy pocas. Lo más probable es que fueran moscas (tal vez fórides, piofílides o esferocéridas). Pero la fosilizada impresión de un élitro quitinoso apunta a que también hubo





ROBERT B. PICKERING Y EPHRAIM CUEVAS

2. LAS "TUMBAS DE POZO" de la región mexicana de Occidente constan de una o más cámaras situadas al fondo de un pozo vertical. En ellas se solían dejar piezas de cerámica, tales como incensarios, figurillas y cuencos, en su momento llenas de comida y bebida. Punzones de obsidiana, trompetas de caracol marino, hachas de basalto y collares de conchas acompañaban también al difunto. En las superficies de los objetos cerámicos se ven a menudo residuos de puparios y negras máculas de dióxido de manganeso.

¿QUIENES FUERON LOS ANTIGUOS MEXICANOS DE OCCIDENTE?

En la costa oeste de México, en la región de Occidente, se han ido sucediendo las culturas desde hace, al menos, diez mil años. Hará unos dos mil hubo en la región un pueblo del que apenas si sabemos otra cosa que lo que nos enseñan las “tumbas de pozo” donde sepultaba a sus muertos junto con diversos artefactos, entre ellos vasijas y figurillas cerámicas. Estas tumbas se hallan distribuidas por numerosos lugares de varios estados de Occidente (*triángulos en el mapa*).

Entre otras características culturales, el pueblo de las tumbas de pozo se distinguió de los del resto de Mesoamérica por su arquitectura. A diferencia de las rectangulares pirámides escalonadas de Teotihuacán, las construyeron también escalonadas, pero circulares. Hoy sólo parecen meros montículos y plataformas circulares, como los hallados en Teuchitlán (*abajo, izquierda*).

Las piezas cerámicas proporcionan algunos de los mejores indicios para conocer la vida de aquellas gentes. Unas son vasijas y diversos objetos útiles para los quehaceres diarios; otras quizá tuvieran funciones rituales. Muchas figurillas representan a individuos en acción. A modo de ejemplo, este músico (*en medio, izquierda*) toca un instrumento que consta de una baqueta de cuerna de ciervo y una concha de tortuga. El modelo cerámico de un edificio (*en medio, derecha*) muestra una casa típica, con comidas y actividades al aire libre en el nivel superior y una planta cerrada en el inferior. Dos pequeñas figuras (*abajo, derecha*) dan alguna idea de su indumentaria. Sugieren que debían de pintarse el cuerpo o tatuarse.

En comparación con lo que sabemos de las culturas del valle central de México, queda mucho por conocer sobre el pueblo que vivió en Occidente hace 2000 años. Sin embargo, el reciente aumento del número de excavaciones arqueológicas en la zona promete grandes descubrimientos.





ROBERT B. PICKERING Y EPHRAIM CUEVAS

escarabajos domésticos. Los conservadores de los museos suelen emplear derméstidos para quitarles la carne a los especímenes destinados a colecciones osteológicas. Las larvas de escarabajo pueden dejar un esqueleto tan mondo y limpio que apenas si haya que preparar el ejemplar para que figure en la colección. Los ciclos biológicos de las moscas y de los escarabajos se parecen hasta cierto punto; los dos han de encontrar un sitio protegido para la pupación.

Analizamos también varios supuestos que pudieran explicar cómo se introdujeron los insectos en la tumba. Yo mismo había examinado los restos humanos de Huitzilapa: sabía que habían permanecido allí intactos, si bien cinco de los seis carecían ya de líquido corporal antes de introducirlos en la tumba. Debieron de sellarla justo después de que muriese esa sexta persona. Dados el calor y la humedad del entorno, resulta razonable suponer que un cadáver no protegido podría infestarse de huevecillos de insectos a los pocos minutos (o a lo sumo a las pocas horas) de la muerte. Así, cuando el sexto cadáver fue bajado a la tumba, los necrófilos que llevase entraron también en ella. Eclosionados los huevos, las recién salidas larvas se alimentarían del cadáver que se iba descomponiendo, hasta que, una vez saciadas, emigrarían a un lugar apropiado para pupar, en este caso a los objetos cerámicos que había en la tumba.

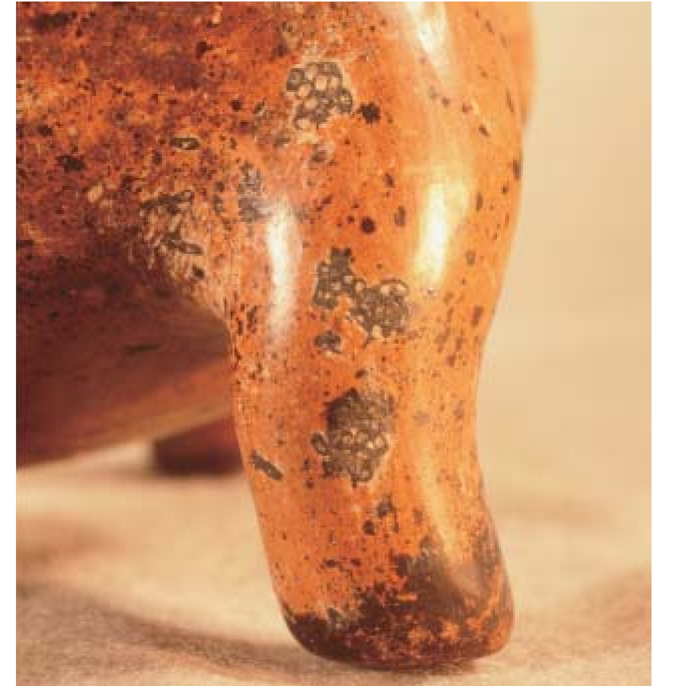
El ambiente de la tumba es un factor decisivo no sólo para la conservación de los cadáveres, sino también para la supervivencia de los insectos necrófilos. Una tumba como la de Huitzipala viene a ser como una habitación con aberturas al exterior (o, en nuestro caso, a la estructura de encima) que posibilitan que en el interior circule el aire. Una sepultura común cuenta con mucho menos espacio, está llena de tierra y contiene muy poco aire. Aunque unos insectos voladores pudieron entrar en la tumba de Huitzipala por sus pequeñas aberturas al exterior, la mayor oportunidad para la infestación la proporcionó el proceso mismo del enterramiento. Las tumbas de pozo del oeste de México a veces se hallan bastante debajo de la superficie (la hondura de los pozos es a menudo de entre 3 y 20 metros). Son cálidas, húmedas, bastante estables. Para un insecto necrófilo pueden resultar de lo más acogedoras: encuentra en ellas una fuente de sustento (el cadáver), oxígeno y bochorno. Mientras perduren estas condiciones, proseguirá el ciclo vital del insecto. Pero no durarán indefinidamente. Parece probable que lo primero en desaparecer será la comida: la carne del cadáver.

Al examinar las cerámicas, Haskell notó que muchos de los residuos de puparios presentaban una densa mineralización. ¿Habría alguna relación entre los puparios y las motitas negras? Observadas éstas con un microscopio electrónico de barrido, se confirmó que consistían en efecto en mineralizaciones, sobre todo de manganeso y de hierro. Tras algunas búsquedas en la literatura especializada y varias conversaciones con el bacteriólogo Roy Cullimore, de la Universidad

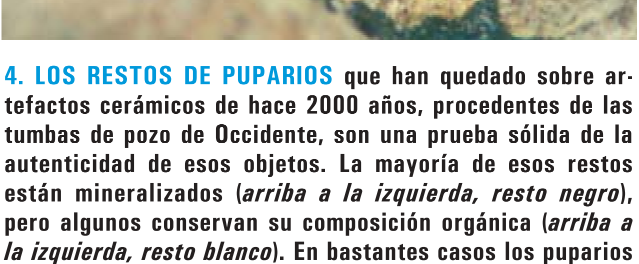
3. EL CICLO BIOLOGICO DE LOS INSECTOS que entraron en la tumba de Huitzilapa se desarrolló en diferentes sustratos. Debieron de introducirse en la tumba al haberse depositado unos huevos en un cadáver antes de que lo sepultaran; eclosionados, las larvas se alimentarían de los cadáveres hasta que emigraron a una superficie más seca, como la de las piezas cerámicas colocadas en la tumba, donde formaron las pupas. Acabada la fase de pupas, los adultos emergieron, criaron y el ciclo se repitió. Todo lo que queda de las acciones de los insectos son los residuos de sus puparios sobre las piezas cerámicas. Puede que sólo intervinieran una o dos especies de insectos; no han sido identificadas con precisión. Las candidatas más probables son tres especies de moscas (*sólo mostramos una*) y un escarabajo (*arriba*).

ROBERT B. PICKERING Y EPHRAIM CUEVAS









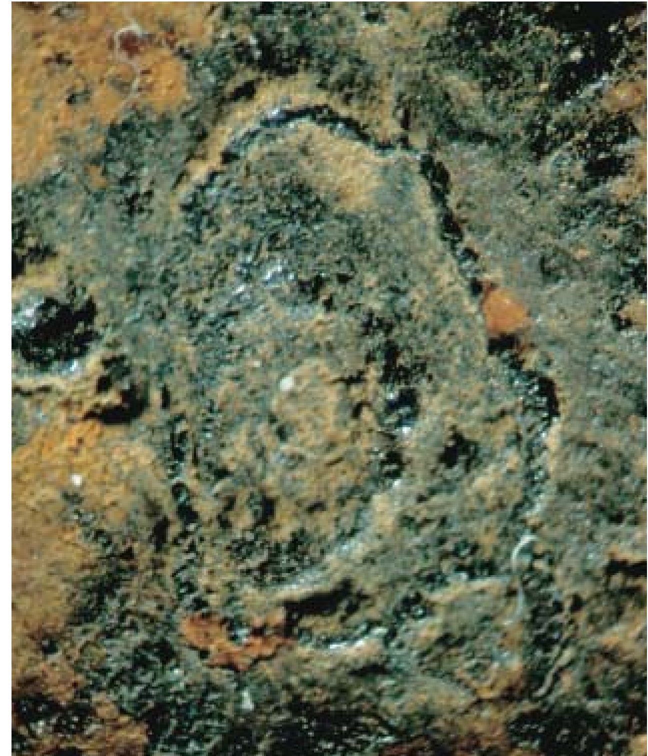
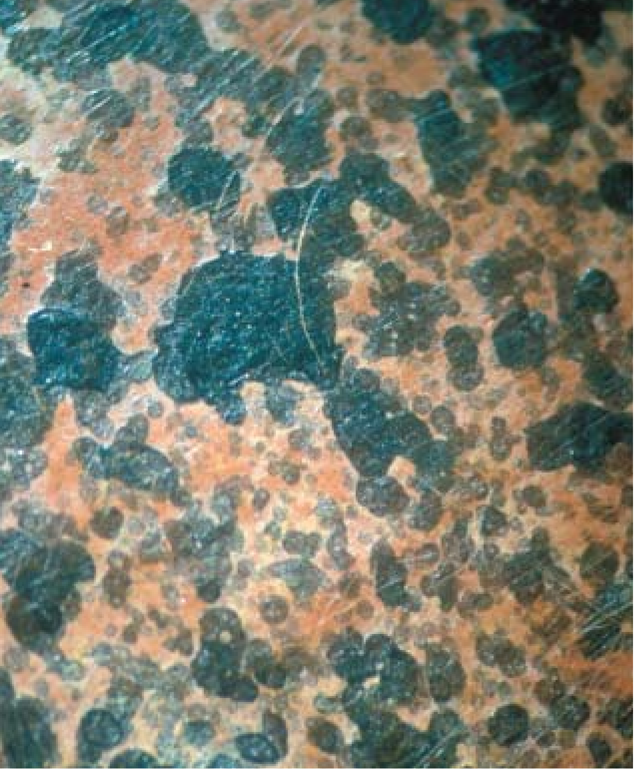
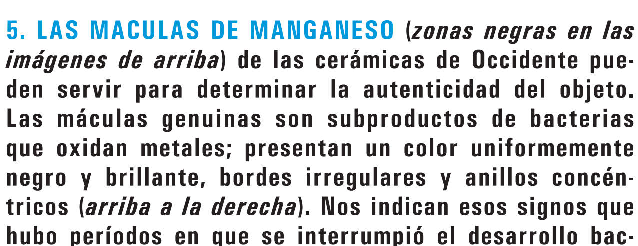


4. LOS RESTOS DE PUPARIOS que han quedado sobre artefactos cerámicos de hace 2000 años, procedentes de las tumbas de pozo de Occidente, son una prueba sólida de la autenticidad de esos objetos. La mayoría de esos restos están mineralizados (*arriba a la izquierda, resto negro*), pero algunos conservan su composición orgánica (*arriba a la izquierda, resto blanco*). En bastantes casos los puparios forman densas agrupaciones (*arriba a la derecha, en la pata de una figurilla*). La impresión de un élitro quitinoso (*abajo a la izquierda*) indica que pudo haber en la tumba un escarabajo (*Dermestes*). Pese al enérgico raspado efectuado por algún bienintencionado coleccionista o conservador para limpiar la pieza, quedan sobre ésta algunos restos de puparios (*abajo a la derecha, anillos negros*).

ROBERT B. PICKERING Y EPHRAIM CUEVAS

de Regina, obtuvimos más respuestas. Tales máculas resultan, según parece, de las acciones de unas bacterias —como indicó ya, para las piezas de Occidente, Meredith Aronson, de la Universidad de Arizona— y no de fenómenos geológicos. Algunas bacterias, como *Metallogenium* y *Leptothrix discophora*, usan los electrones de ciertos metales (especialmente hierro y manganeso) para producir ATP (adenosín trifosfato); al depositarse el metal así oxidado donde la colonia se va formando se produce la mota negra. Procesos parecidos forman en el océano nódulos de manganeso y costras de óxido de manganeso en las tuberías de agua. Así, el mismo microambiente que en la tumba permitió a los insectos recorrer sus ciclos vitales, posibilitó el desarrollo de las bacterias fijadoras del manganeso. Puede que los residuos de los puparios adheridos a recipientes tes sirviesen también de fuente de energía para las bacterias, lo que quizás explique por qué algunos estaban mineralizados. En esos casos, cabe afirmar casi con certeza que las mineralizaciones ayudaron a que los residuos de los puparios se conservaran durante 2000 años.

Las motas de manganeso presentan unas características que concuerdan con los restos que es de esperar deje una colonia bacteriana. Al morir, cada bacteria deja tras sí una partícula metálica insoluble, del tamaño de una célula. Estos depósitos individuales tienen en conjunto las características de una colonia bacteriana, pero hecha de metal. El hierro y el manganeso son los metales que las bacterias oxidan con


5. LAS MACULAS DE MANGANESO (*zonas negras en las imágenes de arriba*) de las cerámicas de Occidente pueden servir para determinar la autenticidad del objeto. Las máculas genuinas son subproductos de bacterias que oxidan metales; presentan un color uniformemente negro y brillante, bordes irregulares y anillos concéntricos (*arriba a la derecha*). Nos indican esos signos que hubo períodos en que se interrumpió el desarrollo bacteriano. En cambio, las máculas negras que a veces pintan los falsificadores en sus cerámicas de imitación para que parezcan auténticas (*imágenes inferiores, zonas negras*) suelen estar desigualmente coloreadas y son mates y no del todo negras, redondas y de bordes lisos. En algunos casos el procedimiento con que se las ha añadido al objeto se revela por la presencia de largas salpicaduras de pintura (*abajo a la derecha*).

ROBERT B. PICKERING Y EPHRAIM CUEVAS

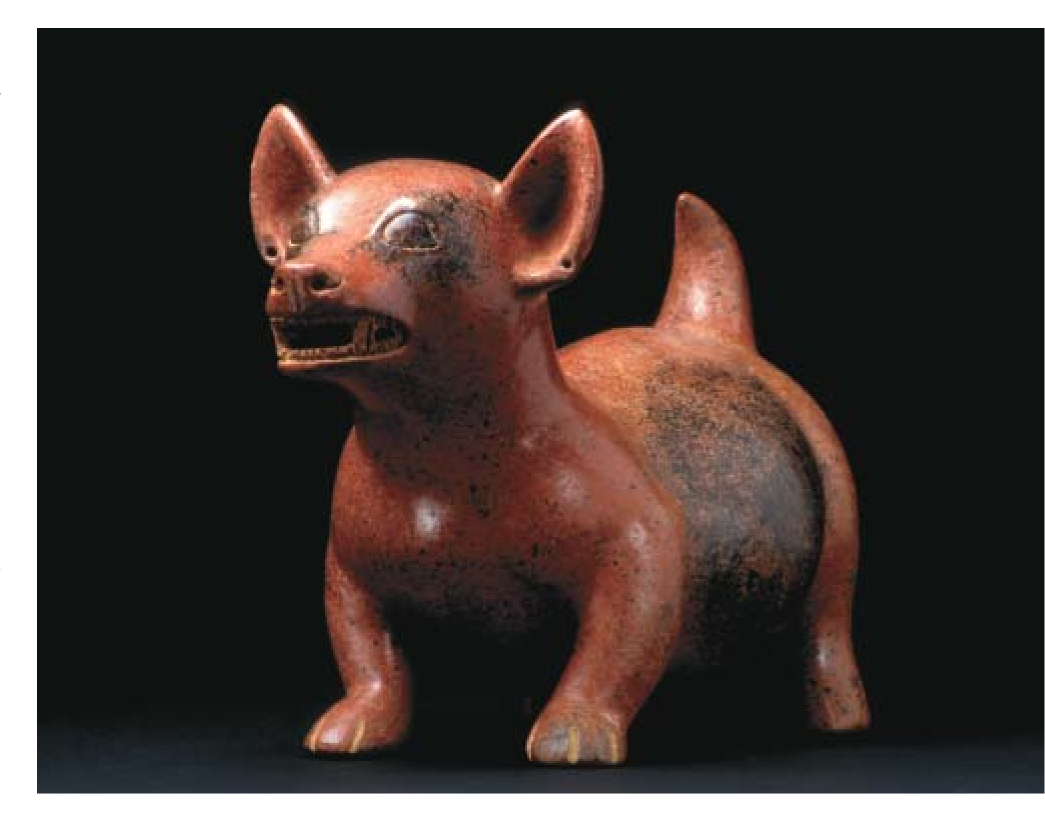
mayor frecuencia; también los que predominan en las manchas negras que observamos con el microscopio electrónico de barrido. Vistas con un microscopio óptico, las máculas muestran un brillo y un color negro uniformes; las formas son irregulares, pero abundan las anulares, con finas estructuras "dendríticas" en sus bordes. Los depósitos tienen también grosor tridimensional, a veces con estratos de diversas concentraciones de metales. Estas variaciones podrían tener que ver con cambios en el desarrollo de la colonia que respondiesen a los del microambiente de la tumba.

Y ¿dónde obtuvieron las bacterias los metales que necesitaban? Aunque en las figurillas cerámicas se encuentran rastros de muchos metales, el hierro y el manganeso que hubiese en ellas se oxidarían ya en el proceso de ignición con que se coció en el horno la arcilla, por lo que no es probable que fueran esos dos metales los que las bacterias oxidasen. Creemos que los metales debió de suministrárselos el agua de la superficie que, con el tiempo, se fue infiltrando en el interior de la tumba y penetró en los artefactos. El agua, al filtrarse por el terreno, se enriquecería de minerales y proporcionaría tanto humedad como metales oxidables con

los que la colonia pudo alimentarse y desarrollarse, durante muchos años. Se habrían producido así unos depósitos metálicos que reflejarían los cambios de las condiciones climáticas a través de un largo intervalo de tiempo. Quizá sean un indicio de esos cambios las máculas estratificadas que hemos observado.

¿Y los puparios de los insectos? En general, parece que la mineralización de estos residuos dependió de su ubicación en la pieza de cerámica: cuanto más expuestos estuvieran al ambiente, más probabilidades tuvieron de mineralizarse. Esto es coherente con la idea de que los residuos fueron mineralizados por bacterias. Una hipótesis: el carbono y el contenido líquido de un insecto, muerto poco antes, atraían a las bacterias, pero éstas quedaban inactivas tan pronto como se les acababan esas provisiones; algún tiempo después, las pocas partes por millón de metal disuelto en el agua infiltrada en la tumba bastaban para promover el desarrollo de la colonia, dando por último resultado que el depósito del metal oxidado conservase la forma del pupario. Puesto que el agua infiltrada sólo mojaba las superficies más expuestas de las cerámicas, era improbable que los residuos de puparios que no entraran en contacto con el agua se mineralizasen mucho.

Las máculas negras patentizan, desde luego, que la mineralización no se ha producido sólo en los sitios en que había residuos de puparios. Las máculas debieron de generarse también donde se combinaron otras humedades y fuentes de material. Aunque los residuos de insectos no guardan una relación directa con la deposición de manganeso, puede que la colonia bacteriana empezase a prosperar allí donde hubiese puparios. También se han encontrado depósitos de manganeso asociados a otras sustancias orgánicas —briznas de madera, hierba o fibra vegetal— en las superficies de varios artefactos. Por consiguiente, aun cuando no hallamos una sustancia orgánica en el sitio de cada depósito de manganeso, puede que restos de comida u otros residuos orgánicos pegados al artefacto sirvieran alguna vez para iniciar el desarrollo de la colonia bacteriana.



CORTESIA DE S. CAMPBELL/CENTRO HISTORICO BUFFALO BILL

6. ESTA MODERNA IMITACION de un perro de cerámica de Occidente evidencia el refinamiento de los falsificadores. Los periódicos auges del interés por las cerámicas mexicanas multiplican los saqueos de tumbas y fomentan la falsificación de piezas. A medida que los coleccionistas y los entendidos aprenden a distinguir las falsificaciones, los que las fabrican van creando nuevas versiones más "refinadas". De este modo, aprendiendo los métodos de la otra parte, se desarrollan generaciones de falsificadores: los mismos estudiosos que tratan de identificar las falsificaciones contribuyen a que las siguientes sean aún de mayor calidad, más difíciles de distinguir.

De las manchas al conocimiento

Los remanentes de los puparios y los depósitos de manganeso menoscaban un poco la belleza de las antiguas cerámicas del oeste de México. Pero el coleccionista de arte y el arqueólogo, más que deplorar la existencia de estas "manchas", deberían apreciarla. En primer lugar, la presencia de residuos de puparios en ciertos artefactos cerámicos es una segura indicación de su autenticidad. Hubo un tiempo, por los decenios de 1960 y 1970, en que muchos museos y coleccionistas particulares no dudaban en comprar objetos cerámicos saqueados de tumbas del oeste de México. También fue por entonces cuando algunos artesanos empezaron a producir hábiles falsificaciones. Es probable que en la mayoría de las colecciones de aquel entonces, si no en todas, abunden las piezas falsas.

Los arqueólogos que trabajaban en Occidente desconocían la existencia de ovoides en las cerámicas que eran residuos de puparios; tampoco sabrían nada al respecto los fabricantes de las falsificaciones modernas, por muy al corriente que estuvieran de la bibliografía profesional. En este mismo momento, no es probable que ni los falsificadores más refinados estén imitando la presencia de motas de puparios en sus reproducciones. Por descontado que la ausencia de tales manchas no significa que las cerámicas sean falsificaciones. Hay muchas causas por las que podrían

no haberse desarrollado. Tan delicados residuos, además, quizá hayan sido eliminados en una pieza concreta, de un modo o de otro; por ejemplo, por la exagerada limpieza de un bienintencionado conservador. Hasta cierto punto, los depósitos de manganeso pueden resultar un indicio todavía mejor de la autenticidad, puesto que abundan más que los residuos de puparios. Sin embargo, con ellos la tarea de la identificación resulta un poco más ardua, porque los falsificadores saben que en estas cerámicas antiguas se suelen encontrar máculas negras y, por lo tanto, las añaden a menudo a sus fabricaciones. No obstante, el examen microscópico de una reproducción moderna en la que se habían pintado manchas negras imitando las máculas de manganeso reveló diferencias palmarias. Las manchas pintadas tienden a estar desigualmente coloreadas, a ser mates y a no resultar negras del todo. Suelen también ser redondas y de bordes tajantes y regulares. En algunos casos en que los bordes sí parecen dendríticos, como los depósitos auténticos, basta ampliar más para que dejen de parecerlo. Cuesta rayar los depósitos de manganeso auténticos (exhiben una dureza 6-6,5 en la escala de Mohs), mientras que a las manchas pintadas se las raya fácilmente. En cuanto se es consciente de estas diferencias, resulta bastante fácil distinguir al microscopio entre las piezas auténticas y las reproducciones.

Por ahora, no hay muchos métodos que determinen la autenticidad de un artefacto cerámico. La mayoría de los especialistas se basan en consideraciones estéticas, estilísticas y temáticas —juicios muy subjetivos—, y comparan el objeto en cuestión con algún tipo ideal. El mejor procedimiento para determinar la edad, y por ende la autenticidad, de las cerámicas cocidas, es la datación por termoluminiscencia. Aunque esta técnica da las edades de los artefactos con cierta exactitud, presenta algunos inconvenientes: obliga a dañar un tanto la pieza y requiere instrumental especializado, además de tiempo y dinero si hay que enviar el artefacto a otro laboratorio. En cambio, la mayoría de los departamentos arqueológicos dispone de microscopios, que no tienen por qué ser muy poderosos; no se requiere mucha práctica para reconocer los residuos de puparios y los depósitos de manganeso.

Tomando como criterios de autenticación los residuos de puparios y las máculas de manganeso, descubrimos en una selección de 271 artefactos del Museo de la Naturaleza y de la Ciencia de Denver un número considerable de falsificaciones. En total, se estimó que 68 artefactos eran reproducciones modernas y la autenticidad de 35 pareció dudosa. Por otro lado, los restos de insectos determinaron que 38 piezas eran auténticas, mientras que a otras 105 se las juzgó también genuinas porque mostraban verdaderas máculas de manganeso. Otras 25 más deben de ser auténticas, pero sus máculas resultan demasiado débiles para basar en ellas una identificación positiva.

Aparte de ayudar a la autenticación de los artefactos cerámicos, los restos de puparios y los depósitos de manganeso quizá contribuyan también a que se sepa más acerca de aquel pueblo que habitó Occidente. Les añaden valor a las piezas, por lo menos para los estudiosos. Como tantas tumbas han sido saqueadas y tan pocas excavadas sistemáticamente por los arqueólogos, no se sabe mucho acerca de sus gentes. Por ejemplo, la identificación de las especies de insectos presentes en la tumba nos diría algo sobre sus prácticas funerarias. Algunas especies de moscas necrófilas son más comunes durante ciertas estaciones del año; podría decirnos cuándo se colocaron los cadáveres en la tumba. Además, algunos insectos prefieren restos de muertos recientes, mientras que otros, como los escarabajos derméstidos, se alimentan de los cadáveres ya resecos. Una exacta identificación de la especie indicaría el estado de los restos en el momento del entierro. Identificar de manera definitiva los insectos que intervinieron requerirá la prueba del ADN.

Esta investigación ha tenido en cuenta sólo la parte occidental de México. Pero sus consecuencias rebasan con mucho esta región. Los objetos funerarios de culturas que en otros lugares enterraron a sus difuntos en similares condiciones podrían exhibir también infestación de insectos y maculaciones de manganeso. Doug Bradley, del Museo Snite de Arte, en la Universidad de Notre Dame, ha encontrado hace poco residuos de puparios y máculas de manganeso en figurillas olmecas (de unos 3400 años de antigüedad) desenterradas cerca de Ciudad de México. Algunas tumbas de la zona maya parecen también apropiadas para este tipo de investigación. El esfuerzo continuo deberá ir refinando nuestra capacidad de reconstruir las vidas y muertes de quienes crearon esas antiguas culturas.

Bibliografía complementaria

THE SHAFT TOMB FIGURES OF WEST MEXICO. H. von Winning. Southwest Museum; Los Angeles, 1974.

MICROBIAL ORIGIN OF DESERT VARNISH. R. Dorn y T. Oberlander, en *Science*, vol. 213; págs. 1245-1247; 1981.

THE ARCHITECTURE OF THE TEUCHITLÁN TRADITION OF THE OCCIDENTE OF MESOAMERICA. P. Weigand, en *Ancient Mesoamerica*, vol. 7; págs. 91-102; 1996.

GEOMICROBIOLOGY: INTERACTION BETWEEN MICROBES AND MINERALS. J. F. Banfield, K. Nealson. Mineralogical Society of America; Washington, D.C., 1997.

DISCOVERING THE OCCIDENTE. R. B. Pickering, en *Archaeology*, noviembre-diciembre, págs. 42-4; 1997.

MORTUARY PRACTICES IN THE SHAFT-TOMB REGION. R. B. Pickering y M. T. Cabrero, en *Ancient West Mexico: Art and Archaeology of the Unknown Past*. Dirigido por Richard Townsend, págs. 71-88. The Art Institute of Chicago y Thames & Hudson; Chicago, 1998.

ARCHAEOLOGY, INSECTS AND ESTABLISHING AUTHENTICITY OF WEST MEXICAN FIGURINES. R. B. Pickering. Denver Museum of Natural History, MQ; verano, págs. 16-17; 1998.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Wolfgang Bürger

Pulgas, escarabajos y saltadores de altura

Para brincar, se convierte energía elástica almacenada previamente en energía de movimiento. Se dispone de poco tiempo; enseguida predomina de nuevo la gravedad

Fuerza gravitatoria: La ingeniería nos ha liberado dos veces de las ataduras de la gravedad. Desde hace cien años sabemos, como las gaviotas, flotar sobre remolinos ascendentes del aire. En los últimos cincuenta, hemos aprendido a navegar con vehículos espaciales que describen trayectorias balísticas a través de un espacio casi vacío, pero sólo mediante un importante gasto de energía. Saltar con las propias fuerzas se nos ha quedado en nada. La fuerza gravitatoria nos retiene, seres sin alas, en la superficie terrestre; sólo nos permite gozar de una sensación de ingravidez durante unos segundos y gracias a un esfuerzo máximo.

Para que la lucha tenaz por llegar unos centímetros más arriba en el salto de altura resulte más atractiva para la televisión, se podrían organizar campeonatos en la Luna, donde los deportistas, bajo la influencia de una menor gravedad, saltarían seis veces más que en la Tierra. No con traje espacial, sino con atuendo deportivo, y dentro de grandes pabellones con aire, de 15 metros de altura, para que nadie chocara con el techo. Nos iba a costar un poco de calderilla, así que mejor será que volvamos a la Tierra.

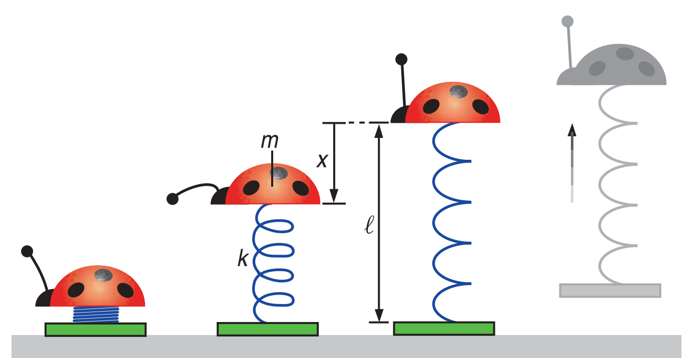
Alguien que mida 180 centímetros tendrá que elevar su baricentro alrededor de un metro para sobrepasar un listón situado a dos. (El centro de gravedad se encuentra a una altura equivalente a un 55 por ciento de la estatura; en este caso, pues, a un metro del suelo.) Necesitará una velocidad de salto de aproximadamente 16 kilómetros por hora. Si quisiera entrar en órbita alrededor de la Tierra, tendría que saltar más de 1800 veces más rápido. Con esto se comprenden los órdenes de magnitud.

La fuerza elástica bien entrenada de la pierna saltadora es el requisito más importante para un salto con éxito. La constitución del saltador limita la elevación del baricentro conseguida con ese resorte; no se la puede aumentar indefinidamente con el entrenamiento. Los saltadores patilargos con tronco proporcionalmente más corto, los que se ven en las competiciones, cuentan con ventajas constitucionales. Por consideración a los atletas con otras características corporales, el mismo sentido tendría que hubiese en el salto de altura distintas categorías que agrupasen a los deportistas de un tamaño parecido, que lo tienen en la lucha y el boxeo las que los clasifican por el peso.

Salto: Para preparar el salto se tensa el "resorte". Esto se predica por igual del saltador humano, que tense los músculos de las piernas, que del brincador mecánico cuyo muelle se comprima y suelte. Desde el momento en que despegue del suelo, ya no habrá una base que aguante al saltador o al brincador: sobre su cuerpo sólo actuará la gravedad, que lo acelerará hacia abajo con una aceleración g de 9,81 metros por segundo al cuadrado. En el primer segundo tras el despegue, la gravedad reduce la velocidad de ascenso inicial tanto como corre el atleta de cien metros más rápido del mundo: en esos casi 10 metros por segundo, o 36 kilómetros por hora. Puesto que el movimiento ascensional se agota enseguida, al saltador le interesa sobre todo dar a su cuerpo una gran "provisión" de velocidad en el momento del salto. Lo consigue en la fase de aceleración antes del salto, en contacto aún con el suelo, gracias a la expansión de su resorte. Para ello cuenta con dos centésimas de segundo; en ese intervalo estira explosivamente su pierna saltadora y se empuja contra el suelo. La reacción de éste multiplica durante un instante el peso corporal.

El saltador, en vuelo libre tras el salto, pierde todo poder sobre el movimiento de su baricentro y el momento de giro total de su cuerpo. El baricentro no es un punto material del cuerpo. Cambia cuando cambia la postura corporal; puede caer fuera del cuerpo. Se mueve en el espacio como una masa puntual que concentrase toda la masa del cuerpo y sobre la que actuasen las fuerzas que intervengan. En el salto, la única fuerza es el peso; la resistencia del aire se puede despreciar: el cuerpo humano pesa demasiado.

En contra de lo que creen algunos entendidos en deportes, el saltador no puede acelerar su cuerpo tras elevarse del suelo. No dispone de cohetes para aumentar su velocidad sin contactar con el suelo. Otra cosa sería si el reglamento le permitiese llevar en las manos unos pesos y lanzarlos, una vez en el aire, hacia atrás o hacia abajo. Al final del siglo XIX, los atle-



1. La mariquita brincadora obtiene su energía de la distensión de un muelle comprimido

tas ingleses realizaron saltos de longitud de más de 13,50 metros.

Rendimiento mecánico: Se muevan como se muevan las distintas partes del cuerpo durante el salto, el baricentro trazará en un plano vertical un tiro parabólico, determinado por la velocidad que lleve al saltar. El saltador intenta intuitivamente ajustar esa parábola de manera que llegue a su apogeo cerca del listón. En casi todas las técnicas de salto, el centro de gravedad pasa al menos cinco centímetros por encima del listón, excepto en el "Fosbury Flop". En esta técnica, el saltador sobrevuela de espaldas el listón, al que se acerca tanto, que el centro de gravedad le queda hasta diez centímetros por debajo. Los atletas aseguran (pero es difícil de creer) que girando sobre el listón boca abajo no se puede conseguir una ganancia de energía análoga.

Para conseguir una elevación del baricentro de $h =$ = 1 metro, el saltador tiene que alcanzar, gracias a la fuerza elástica de su pierna de salto, una velocidad ascensional inicial de $v_0 = \sqrt{2gh}$ = 4,4 metros por segundo (16 kilómetros por hora). Aunque los saltadores de altura también cogen carrera, no pueden convertir su impulso horizontal en un movimiento vertical de salto, como hacen los saltadores de pértiga. Está claro que la pierna no puede actuar a la vez como pértiga rígida y como resorte flexible.

El rendimiento mecánico de un saltador de altura es formidable. Un atleta con una masa m de 80 kilogramos que se acelera en un tiempo T de 0,2 segundos para un salto de dos metros (h = 1 metro) desarrolla efímeramente una potencia $P = mgh/T$ de 3,9 kilowatt o 5,3 CV. Se dice que en saltos que han conseguido un récord se ha llegado a rendimientos momentáneos de hasta 9 kilowatt (12 CV). En un salto de dos metros, el deportista está en el aire unos $t = 2\sqrt{2h/g} =$ = 0,9 segundos, hasta que el baricentro vuelve, al otro lado del listón, a la distancia del suelo a la que se encontraba antes del salto. Con un ángulo de despegue $\alpha = 65^o$ (valor experimental), la velocidad de avance vale $u = v_0 \text{ cotang } \alpha$ = 2,1 metros por segundo (7,5 kilómetros por hora) y el desplazamiento $s = ut =$ = 1,9 metros.

Ante las fronteras infranqueables del rendimiento deportivo, el aumento, centímetro a centímetro, de las

FISICA DEL SALTO DE ALTURA

La fuerza elástica contra la gravedad terrestre

Como modelo más simple de los saltos de escarabajos, pulgas y brincadores, con sus diferentes técnicas de salto, escojo —excepción hecha de los pequeños brincadores del museo infantil de Hiroshima— la distensión de un muelle mecánico comprimido, con una ley lineal para la fuerza de recuperación $F(x) = kx$; *donde* x es la elongación momentánea del muelle. La rigidez k del muelle, su elongación máxima ℓ y la masa m del saltador constituyen las principales características que determinan el salto.

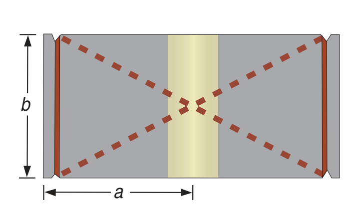
Despegue y vuelo libre: Supongamos que el muelle no pierde energía elástica durante la aceleración del saltador. La energía elástica $k\ell^2/2$ del muelle tensado al máximo se convierte, al destensarse por completo, en la energía cinética $mv_0^2/2$ del saltador. La velocidad de partida del saltador es, pues, $v_0 = \sqrt{k/m}\,\ell$. (En el recorrido del muelle de longitud ℓ se despreció —para grandes saltos— el peso del saltador en comparación con la fuerza del muelle, en promedio mucho mayor.) Igualando la energía inicial $mv_0^2/2$ con la energía potencial mgh ganada durante la ascensión en un campo gravitatorio se obtiene la altura $h = v_0^2/(2g) =$ $= k\ell^2/(2mg)$.

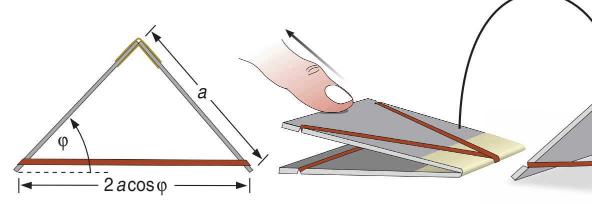
Duración y aceleración: El muelle se destensa en un tiempo T, el que un mecanismo oscilante de masa m con una rigidez k del resorte requiere para un cuarto de su oscilación ($\pi/2$): $T = (\pi/2)\sqrt{m/k} = (\pi/2)\ell/v_0$. Las mayores aceleraciones aparecen durante la fase de partida y se puede estimar en una media temporal mediante

$$\frac{v_0}{T} = \frac{2}{\pi}\frac{v_0^2}{\ell}$$

Multiplicando por la masa se deduce la fuerza promedio sobre el baricentro.

Para el brincador de Hiroshima: En la fase de partida, su energía potencial es, en buena aproximación, sólo la energía de la cinta de goma tensada, $V = 2k(a \cos \varphi)^2$ (la elongación de la cinta de goma es proporcional a la abertura $2a \cos \varphi$; k es la constante del resorte del sistema completo, no de la cinta de goma). La energía inicial $V = 2ka^2$ se transforma en energía potencial para elevar el baricentro (esta porción es despreciable en la fase de partida) y la energía de rotación $K = m(a d\varphi/dt)^2/6$ de ambas aletas. De la conservación de la energía ($K + V = 2ka^2$) resulta la ecuación del movimiento $d\varphi/dt = \sqrt{12k/m}$ sen φ. Durante la fase de partida, el baricentro tiene la altura $z = (a/2)$ sen φ sobre la superficie de la mesa. Su aceleración en dirección vertical es $d^2z/dt^2 = (6ka/m)$ sen φ cos 2φ. Será cero para $\varphi =$ $= 45^o$: el brincador se elevará con este ángulo. El ascenso sólo aprovecha parcialmente la energía almacenada en un principio en la goma. La energía restante que, tras la elevación, queda retenida en los giros, se disipa en un choque inelástico al golpear una aleta contra la otra.





THOMAS BRAUM





2. El escarabajo del alambre puede plegar de repente la cabeza y la parte inferior del cuerpo sobre el abdomen mientras se halla en posición supina. Así puede golpear con su "nuca" la superficie sobre la que se encuentra; el retroceso acelera todo el animal hacia arriba.

STEFAN GARBE (*izquierda*); THOMAS BRAUM (*derecha*)

marcas en el salto de altura se convierte en una competición de las técnicas de salto. Levantar de golpe los brazos y batir en alto la pierna libre en el momento del salto aumenta el empuje del suelo y, con ello, la altura saltada. Para sobrepasar el listón hay que tomar carrera, pero una moderada velocidad continua de 2 metros por segundo bastaría para el desplazamiento horizontal de alrededor de 2 metros necesarios para lograrlo. ¿Por qué, entonces, renombrados saltadores de altura corren antes del salto hasta a 7 metros por segundo (25 kilómetros por hora, o 100 metros en 14,3 segundos), que con un tiempo de vuelo de 0,9 segundos corresponden a un desplazamiento s de 6,30 metros? La velocidad de carrera se frena mucho en el último paso. El impulso de frenado horizontal aporta el giro corporal necesario para un salto óptimo. El mismo giro se podría conseguir gracias a un empuje excéntrico del cuerpo hacia arriba, pero sería una pérdida de energía transferir una parte del trabajo de la pierna saltadora, necesario para acelerar verticalmente el baricentro, al impulso del giro.

Brincador de juguete: Salta gracias a un resorte cuya fuerza sigue una ley lineal (longitud del muelle l = 4 cm). De la altura del salto h = 1,3 m observada, se calcula (*véase el recuadro*) la velocidad de salto v_0 = 5,1 m/s, a la que tiene que acelerarse el brincador en un tiempo T = 0,01 s antes de elevarse. La aceleración media se calcula que vale 41 g (41 veces la aceleración terrestre). Por mor de comparación, equivale a la de una violenta colisión entre automóviles.

Pulga: Mide l = 1,5 mm; es mucho menor que el brincador de juguete; puede sin embargo saltar h = 20 cm de altura, más allá de cien veces su tamaño corporal. Con la velocidad de salto v_0 = 2 m/s (medida) se calcula un tiempo T de aproximadamente un milisegundo para el diminuto saltador, mientras está expuesto a una aceleración media de 178 g. Debe necesitar más tiempo para disponer de la energía que le faculte a cometer un salto tan tremendo; se supone que almacena energía para el salto en el músculo. Pero esto no explica cómo puede aguantar las enormes tensiones durante el salto.

Gusanos de alambre y "brincadores de Hiroshima": Un escarabajo, el gusano de alambre en su forma adulta, contrae con unos resortes musculares, rápidamente, cabeza y abdomen, y se catapulta hacia arriba, hasta una altura h de 30 cm, desde una posición supina. Descubrí un peculiar brincador en Hiroshima, en el Museo Infantil de la Ciencia y la Cultura, no lejos del Parque del Recuerdo y la Paz. No es difícil de montar. Dos trozos sólidos de cartón se unen con una cinta adhesiva a modo de bisagra. Se hace pasar una goma elástica corriente, bien tirante, por unas muescas talladas en las cuatro esquinas (con dos o tres gomas el salto será mayor). Los que vi en Hiroshima medían a = 7 cm de largo y b = 5 cm de ancho, para gomas de 4 cm de diámetro.

Se utiliza como sigue: sobre una mesa lisa, apriete el brincador hasta que quede plano, con la gomita cruzada por el reverso. Después suéltelo y retire rápidamente los dedos, para no frenar el movimiento. El ángulo se levantará y despegará más rápido de lo que pueda seguir la vista. El despegue sólo dura 3 centésimas de segundo. Se oye el chasquido de las dos cartulinas y suben como un proyectil hasta un metro y medio de altura. Incluso nuestra cámara de vídeo de alta velocidad —200 imágenes por segundo— se nos quedó corta, pero al menos captó que el saltador despega cuando los cartones forman un ángulo de 45 grados, tal y como se deduce de cálculos elementales (*véase el recuadro*).

Juan M.R. Parrondo

Cita a ciegas

Aunque al lector ajeno al mundo de la investigación le cueste creerlo, una de las partes más importantes —y más leídas— de un artículo científico es la llamada lista de referencias, en la que se encuentran todos los libros, artículos y trabajos que se citan en el texto principal del artículo. Renombrados científicos, al llegar a sus manos el trabajo de un colega, pasan páginas con rapidez convulsa para llegar a la mencionada lista y comprobar si aparecen citados o no. ¿Por qué tanto interés? ¿Pura vanidad? Puede que sea así en buena parte, pero existe otra razón: hoy en día, acertada o desacertadamente, la calidad científica de un trabajo científico se mide por el número de veces que ha sido citado. Aunque cueste reconocerlo, muchos tribunales que juzgan puestos o becas de investigación recurren al número de citas de un artículo para determinar su relevancia, en lugar de leerlo.

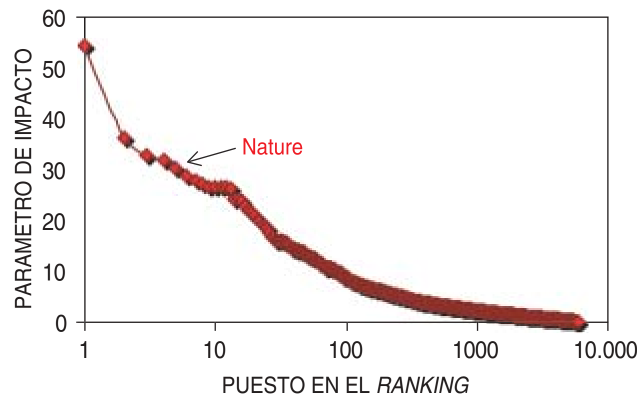
La empresa privada Institute of Scientific Information (ISI) nació en 1958 con el objetivo de recopilar los títulos y resúmenes de todas las publicaciones científicas. En 1961 decidió recopilar también información acerca de las citas. Disponer de un índice en donde se pueden buscar todos los artículos que han citado alguno dado es una herramienta extremadamente útil. Suponga que usted comienza a trabajar en un cierto tema y que encuentra un artículo de 1973 con ideas parecidas a las suyas. Rastrear todos los artículos que, desde 1973 hasta hoy, han citado aquel trabajo le permitirá conocer toda la investigación que se ha hecho en estos últimos 30 años sobre el tema y las ideas que le interesan, algo que es bastante más difícil de obtener sólo mediante búsquedas que hacen uso de las palabras que aparecen en el título o en el resumen de los artículos.

Lo que quizá no esperaban los creadores del ISI es que la recopilación de citas se convertiría con el tiempo en uno de los métodos más utilizados para evaluar, no sólo la calidad de trabajos de investigación, sino también el impacto de las revistas científicas. En efecto, lo que hoy en día determina el éxito de una revista científica es sobre todo su *parámetro de impacto*, que no es más que el número medio de citas que recibe cada artículo publicado en la revista. Una de las revistas con mayor impacto es, por ejemplo, *Nature*. Su parámetro de impacto en 2002 es 30,432 porque los 1952 artículos publicados en los años 2000 y 2001 han sido citados, durante 2002, 59.403 veces, es decir, 30,432 veces por artículo. Este es un número medio de citas bastante alto. De las 5830 revistas registradas en el ISI, *Nature* es la quinta con mayor parámetro de impacto. En la figura 1 se puede ver el parámetro de impacto de estas 5830 revistas, en función del puesto que ocupan en una lista en la que se ordenan de mayor a menor parámetro de impacto.

Si las citas constituyen una buena medida de la importancia de un artículo o una revista es un asunto que está permanentemente en cuestión. En primer lugar, existe una cierta picaresca en torno a las citas, ya que editores y censores de revistas tienden a "recomendar" que se citen sus artículos. En segundo lugar, son muy citados los artículos que contienen alguna idea fácil de generalizar, independientemente de que sea relevante o no, mientras que un artículo que resuelva de una vez por todas un viejo problema puede que se cite muy pocas veces.

En esta polémica ha terciado una sorprendente investigación realizada por M. V. Simkin y V. P. Roychowdhury, de la Universidad de California en Los Angeles, y que demuestra que los científicos no somos especialmente cuidadosos ni críticos a la hora de citar otros trabajos. En un primer artículo, titulado "¡Leed antes de citar!", investigaron cómo se propagan los errores en las citas: erratas en los nombres de los autores o en la página del artículo citado. Simkin y Roychowdhury analizaron estadísticamente estas erratas en el caso de un artículo citado 4300 veces y comprobaron que los errores se "propagan" a lo largo de las citas. Por ejemplo, de las 45 erratas que detectaron, una de ellas, las más frecuente, aparecía 78 veces, lo cual indica que muchos de los autores que citan ese trabajo han copiado la cita de la lista de referencias de otros artículos sin comprobar los datos del trabajo citado y, lo que es peor, probablemente sin leerlo.

Un argumento muy simple nos puede servir para estimar la fracción de "citadores" que realmente han leído el artículo. Simkin y Roychowdhury detectaron 196 erratas en las 4300 citas. De estas 196, sólo 45 eran diferentes. Es evidente que, de los 196 autores que han citado erróneamente, 196 – 45 = 151 han copiado,



1. Parámetro de impacto de 5830 revistas en función del puesto que ocupan en una lista en donde las revistas se ordenan de mayor a menor parámetro de impacto

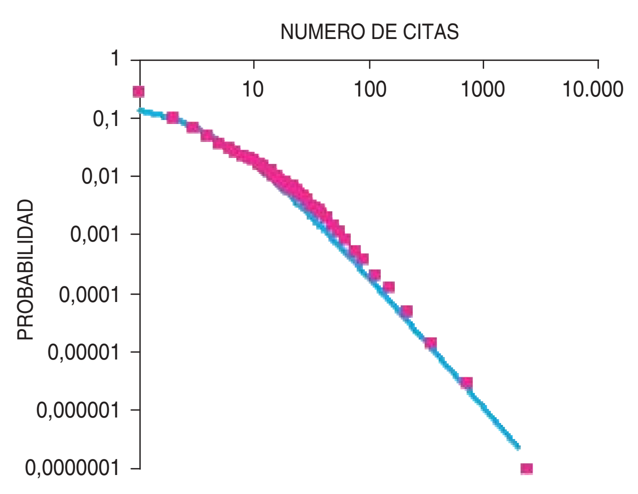
puesto que su errata no es original. Admitiendo la "presunción de inocencia" de los otros 45, es decir, suponiendo que ellos sí han leído el trabajo citado, obtenemos que la fracción de lectores frente a citadores es $R = 45/196 = 0{,}23$. Según esta deducción, los científicos leen menos de la cuarta parte de los artículos que citan. Un argumento más elaborado basado en un modelo probabilístico conduce a un valor casi idéntico, $R = 0{,}22$.

Si los científicos citan copiando la lista de referencias de otros artículos en lugar de leer las referencias originales, entonces puede que tenga lugar un efecto "bola de nieve" en las citas que recibe un artículo. Simkin y Roychowdhury, en un segundo trabajo, han demostrado que esto es posible. Han diseñado un modelo muy simple que reproduce la estadística de las citas. El modelo podría llamarse de "cita a ciegas", ya que supone que cada científico elige las citas al azar, de acuerdo con las reglas siguientes. Supongamos que se han escrito N artículos y que un científico escribe uno nuevo. El científico escoge al azar m artículos de los N existentes, los cita y cita también, con una probabilidad p, las referencias que aparecen en esos m artículos.

El modelo es tan sencillo que se puede simular fácilmente con un programa de ordenador, comenzando con m artículos sin lista de referencias. Puede incluso resolverse de modo aproximado, aunque la forma de hacerlo es demasiado complicada para esta sección. En la figura 2 se muestra la solución del modelo con $m = 3$ y $p = 1/4$. Estos son los valores que mejor se ajustan a los datos reales, extraídos del ISI, y que también se muestran en la figura. La gráfica representa la probabilidad de que un artículo haya sido citado k veces, o equivalentemente, la fracción de artículos citados k veces, en función de k. Como se ve en la figura, el modelo reproduce bastante bien los datos reales. Podemos también comprobar el efecto "bola de nieve" mencionado antes. Supongamos que hay N artículos y que uno de ellos ha sido citado k veces. ¿Cuál es la probabilidad de que lo cite el artículo $N + 1$? Recordemos que en el modelo un nuevo artículo elige m al azar entre los N existentes, los cita y cita con probabilidad p los artículos que aparecen en las listas de referencias de los m elegidos. Por tanto, hay dos posibilidades para ser citado: o bien a) el artículo es elegido entre los m primeros, o b) está en la lista de referencias de algunos de estos m primeros artículos. La probabilidad de que ocurra a) es, aproximadamente, m/N y la de que ocurra b) es km/N. Pero, en el caso b) el artículo es sólo citado con una probabilidad p. Por tanto, la probabilidad de que nuestro artículo con k citas sea citado de nuevo es:

$$\frac{m + pkm}{N}$$

y es mayor cuanto mayor sea k. De hecho, si k es pequeño, será muy poco probable que el artículo sea citado de nuevo. En el modelo de cita a ciegas habrá muchos artículos apenas citados y unos pocos muy ci-



2. La gráfica muestra la probabilidad de que un artículo tenga un número de citas determinado. Sólo aproximadamente uno de cada un millón de artículos es citado más de 1000 veces. La línea azul corresponde al modelo de "cita a ciegas", mientras que los puntos color magenta son los datos reales tomados del ISI. (*Figura cedida por M. V. Simkin*)

tados, tal y como muestra la figura 2. Y es ésta la distribución a la que se ajustan los datos reales.

Otra cantidad que puede extraerse fácilmente del modelo es el número medio de citas en cada artículo. Supongamos que, cuando hay N artículos publicados, la lista de referencias de cada uno ellos tiene, de media, $c(N)$ referencias. Un nuevo artículo aparece y, en media, tendrá un número de referencias:

$$c(N + 1) = m + mpc(N)$$

como se deduce fácilmente de las reglas del modelo de cita a ciegas. Cuando el número total de artículos N es muy grande, el tamaño medio de la lista de referencias apenas cambia. Si c es este valor casi constante, entonces tiene que verificar $c = m + mpc$, lo que da un valor para el tamaño medio de la lista de referencias:

$$c = \frac{m}{1 - mp}$$

Esta fórmula es sólo válida si mp es menor que uno. Si no fuera así, las listas de referencias crecerían indefinidamente. Los valores que mejor reproducen los datos reales son $m = 3$ y $p = 1/4$, lo que da un tamaño medio de $c = 12$ referencias. Los datos del ISI indican que este número es ligeramente superior, en torno a 15. Sin embargo, el acuerdo sigue siendo bueno, especialmente si se tiene en cuenta la simplicidad del modelo.

Aunque es cierto que los científicos muchas veces citan artículos que no han leído, no lo hacen realmente a ciegas, por supuesto. Sin embargo, el modelo sí pone de manifiesto que la red de citas, que puede considerarse como la red en la que se crea y por la que se transmite el conocimiento científico, tiene una estructura bastante homogénea y sorprendentemente sencilla.

Mark Fischetti

TEJIDOS INTELIGENTES

Camisas frescas

El sudor nos refresca al evaporarse sobre la piel, pero esa humedad se remansa en la ropa; la temperatura corporal sube así y se suda aún más. Para evitarlo, los fabricantes de ropa están inundando el mercado de artículos deportivos con tejidos "gestores de la humedad", que eliminan el sudor por acción capilar y se secan pronto. Se trata sólo de las primeras ropas de refinada manipulación que van a ir apareciendo.

Los tejidos Coolmax, de DuPont, y Moistex, de Asahi Kasei, deben sus virtudes a distintos factores. Se están obteniendo por extrusión fibras de poliéster de alta calidad con contenidos de humedad de tan sólo un 0,5 por ciento, frente a un 4 por ciento del nailon y de un 6 a un 7 por ciento del algodón; eliminan el sudor y se secan mucho antes. Además, con nuevas técnicas de extrusión se producen fibras con unas secciones transversales de borde ondulado (*véase la ilustración*) que canalizan el sudor hacia el exterior. Para conseguir un tejido lo más fresco posible hay que buscar una solución de compromiso entre muchos factores, expresa Michael Hunt, investigador químico de Textiles e Interiores DuPont, en High Point (Carolina del Norte).

Para fabricar ropas de invierno que disipen la humedad pero mantengan el calor, se emplean unas fibras especiales, extruidas en hueco, que retienen aire como aislante. El pelo de la piel de oso polar es hueco, comenta Hunt. CW-X, Under Armour y otros fabricantes de prendas compresoras, que mantienen los músculos en su sitio, combinan las fibras de acción capilar con las hebras compresoras (a menudo lycra) para que lo ajustado de la vestimenta no caliente demasiado a los atletas.

Se persigue la creación de tejidos inteligentes que reaccionen ante condiciones variables, así camisas que cambien de color con la luz solar y chaquetas que dejen pasar el aire pero que se vuelvan estancas en cuanto caigan las primeras gotas de lluvia. La clave se encuentra en las fibras conductoras de polímeros dopados con aditivos, con ácido alcanforsulfónico por ejemplo, capaces de conducir las cargas eléctricas. La lluvia alteraría la conductividad del tejido; los dopantes, entonces, se contraerían y los poros de la prenda se cerrarían.

Frank Ko, profesor de ingeniería de materiales en la Universidad Drexel, explica que ya se han creado fibras conductoras y se han formado tejidos con ellas, pero, dice, aún faltan varios años, como poco, para que se conviertan en artículos comerciales. La dificultad estriba ahora en conseguir un tejido lo bastante estable para que resista el sudor y lo bastante robusto para que aguante las lavadoras.



1. LAS PRENDAS que eliminan el sudor por capilaridad y se secan rápido se tejen con fibras de poliéster.

KENT SNODGRASS *Precision Graphics* (*ilustraciones*); DUPONT TEXTILES AND INTERIORS (*micrografía*)

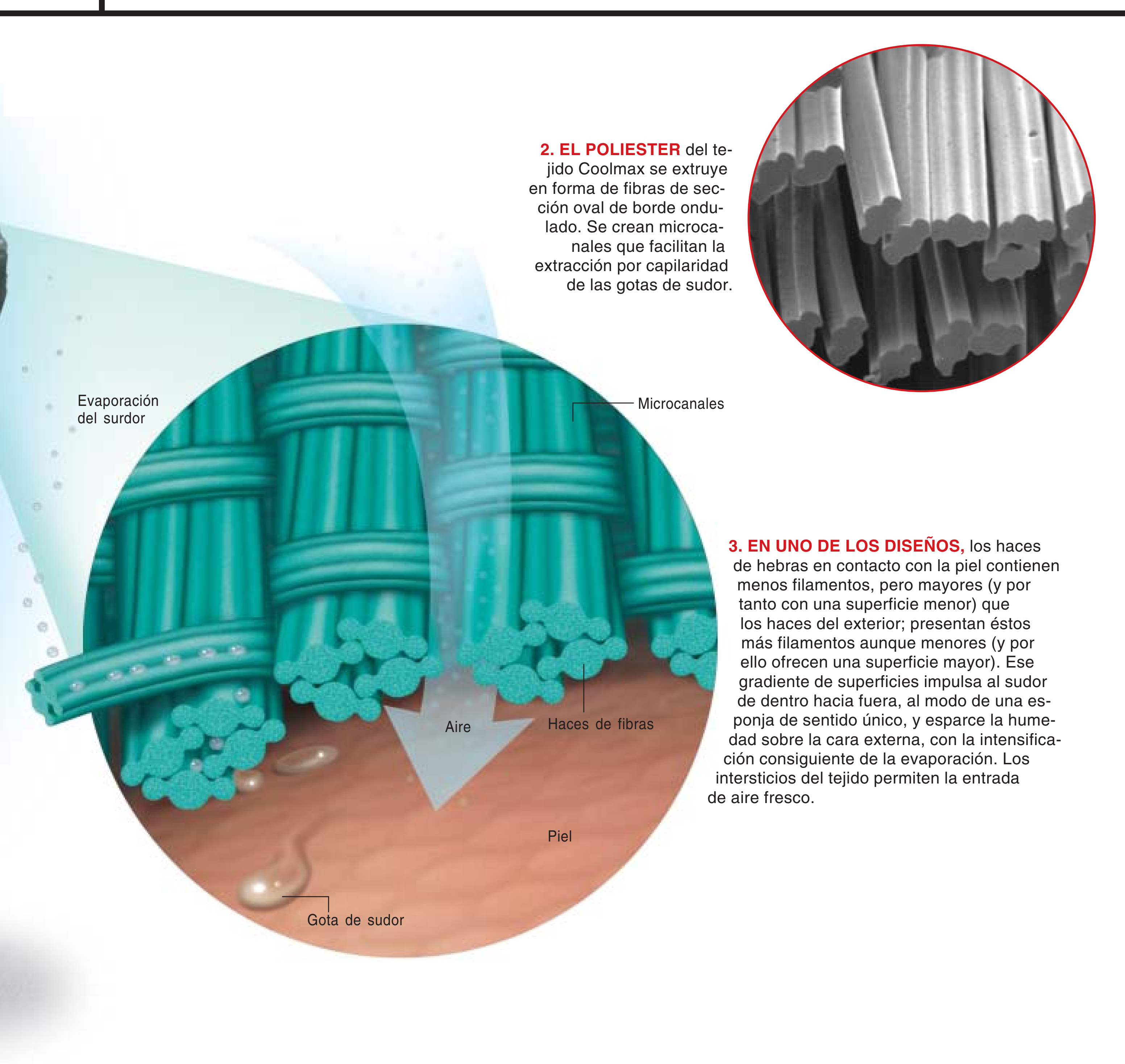
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **ANTIADHERENTES:** Una de las razones de que las fibras sintéticas resulten confortables es que no retengan la humedad. Pero les cuesta dispersar las cargas eléctricas, por lo que tienden a adherirse. Algunos fabricantes les añaden agentes antiestáticos.

➤ **ANTIMANCHAS:** En la publicidad de su nueva línea Go Khaki de pantalones, Dockers afirma que son resistentes a la suciedad gracias a la "nanotecnología". Pero estas prendas se ofrecen sólo con un acabado de teflón, que rebaja la tensión superficial; así los líquidos propenden a adherirse menos. Quizá las moléculas puedan merecer la consideración de "nanotecnológicas", pero los revestimientos de teflón no tienen nada de nuevo.

➤ **ANTISOLARES:** Con una camisa de tejido ralo no es imposible que el Sol nos queme. Los fabricantes pueden hacer una trama más densa para cerrar los orificios, pero ello disminuye el flujo de aire y la camisa resulta más pegajosa. Cabe también añadir a las fibras una sustancia que rebaje el lustre y disperse los rayos ultravioletas, como el dióxido de titanio.

➤ **CAMALEON:** Si los químicos pudieran inventar polímeros conductores dopados con aditivos, sería factible una prenda que virase de verde a azul cuando quien la vistiese pasease de la sombra al sol. La energía solar alteraría la corriente, cambiando la orientación de los dopantes y, por tanto, los colores de la luz que absorben. El ejército de EE.UU. está experimentando con esas telas en busca de un camuflaje versátil. (Hay tintes que cambian de color en reacción ante las variaciones térmicas.)



2. EL POLIESTER del tejido Coolmax se extruye en forma de fibras de sección oval de borde ondulado. Se crean microcanales que facilitan la extracción por capilaridad de las gotas de sudor.

3. EN UNO DE LOS DISEÑOS, los haces de hebras en contacto con la piel contienen menos filamentos, pero mayores (y por tanto con una superficie menor) que los haces del exterior; presentan éstos más filamentos aunque menores (y por ello ofrecen una superficie mayor). Ese gradiente de superficies impulsa al sudor de dentro hacia fuera, al modo de una esponja de sentido único, y esparce la humedad sobre la cara externa, con la intensificación consiguiente de la evaporación. Los intersticios del tejido permiten la entrada de aire fresco.

Estructura del ADN

Descubrimiento polémico

GEORGE BEADLE. AN UNCOMMON FARMER. THE EMERGENCE OF GENETICS IN THE 20TH CENTURY, por Paul Berg y Maxine Singer. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Cold Spring Harbor, 2003.

THE THIRD MAN OF THE DOUBLE HELIX. THE AUTOBIOGRAPHY OF MAURICE WILKINS. Oxford University Press; Oxford, 2003.

"THE COMMON PURPOSES OF LIFE". SCIENCE AND SOCIETY AT THE ROYAL INSTITUTION OF GREAT BRITAIN", dirigido por Frank A. J. L. James. Ashgate; Aldershot, 2002.

GENES, GIRLS AND GAMOW, por J. D. Watson. Oxford University Press; Oxford, 2001.

En la celebración del quincuagésimo aniversario del descubrimiento de la estructura del ADN se ha puesto de relieve el camino triunfal recorrido desde 1953 hasta la cartografía reciente del genoma de muchos organismos y el advenimiento de una industria farmacéutica y agronómica de nuevo cuño. Desde la óptica de la propia investigación básica, y no sólo como mero repaso histórico, importa, sin embargo, volver a andar los pasos que condujeron al descubrimiento de la archifamosa hélice, un episodio que tuvo bastante de intuición y mucho más de inquisición sistemática.

Se definieron las condiciones de contorno cuando se operó el salto de una genética cromosómica (mendeliana, morganiana o clásica) a otra genética molecular (*George Beadle. A Uncommon Farmer. The Emergence of Genetics in the 20th Century*). Al poco del redescubrimiento de las leyes de Mendel, en el umbral del siglo XX, W. S. Sutton observó que los cromosomas, portadores de los genes, se agrupaban en pares, cuyos miembros uno procedía del padre y otro de la madre. Se sabía ya que durante la formación de las células germinales, el número de cromosomas se reducía a la mitad en un proceso de meiosis. Muy pronto se acertó con el animal de experimentación. Un joven profesor de Harvard, W. E. Castle, reparó, avisado por uno de sus alumnos, en la brevedad del ciclo biológico de *Drosophila melanogaster*: en torno a unos diez días. Desde 1901 hasta 1905 realizó numerosos ensayos de cruzamiento consanguíneo que le mostraron que la endogamia no afectaba apenas a la prodigiosa fecundidad de la mosca, que produce de 100 a 400 huevos en cada apareamiento.

No tardaron en aparecer las primeras dificultades. En contradicción con la segunda ley de Mendel, algunos genes no se heredaban independientes, sino juntos, como si se hallaran enlazados. Fue una de las aporías que, entre 1910 y 1915, Thomas Morgan y su grupo de Columbia, en particular Alfred Sturtevant, Herman J. Muller y Calvin B. Bridges, resolvieron mientras ponían las bases de la genética. A ellos les debemos la identificación de los cromosomas como el locus físico de la herencia y la explicación de los mecanismos en cuya virtud el legado se transmite de una generación a la siguiente. Con todo, los genes se consideraban entidades abstractas, definidas por los efectos ejercidos cuando experimentaban mutaciones y se apartaban de su función regular. Los propios guisantes rugosos de Mendel indicaban una mutación. Por eso, los genéticos se concentraron en las mutaciones y en su transmisión hereditaria.

En un comienzo a Morgan le interesó la transformación del legado heredado en caracteres; es decir, el desarrollo embrionario, no los mecanismos de transmisión, que reputaba harto hipotéticos. Su escepticismo se extendía a la tesis de Darwin sobre el origen de nuevas especies a través de la selección. Partidario de la tesis de Hugo de Vries, para quien las nuevas especies aparecían por mutaciones que impedían el cruzamiento, se aprestó a demostrarla por vía experimental. Aunque fracasó en ese empeño, sus trabajos determinaron el nuevo rumbo a seguir. Observó una mosca que presentaba ojos blancos, en vez de los habituales rojo-pardos. Tras repetidos cruzamientos y retrocruzamientos obtenía siempre moscas de ojos blancos o moscas de ojos rojo-pardos; ninguna de la progenie nacía con ojos de color intermedio. Muy a su pesar, concluyó que el carácter ojo-blanco era resultado de una sola mutación (*white*, *w*). La mutación cambiaba un carácter, pero no creaba una especie nueva.

Morgan advirtió también que sólo los machos heredaban el carácter mutante. Nettie Stevens y Wilson habían avanzado ya una explicación de esa herencia ligada al sexo: a partir del examen al microscopio de los cromosomas del díptero, infirieron que las hembras portaban dos cromosomas X y uno, el macho. Si la mutación *white*, razonó, ocurría en el cromosoma X, y no bastaba un alelo *white* para alterar el color normal del ojo, entonces las hembras con el alelo *white* en uno de los cromosomas X y el alelo normal en el otro desarrollarían ojos de coloración normal; sólo las hembras que portaran el alelo *white* defectivo en ambos cromosomas X mostrarían el carácter ojos blancos. Por el contrario, proseguía, si el cromosoma Y carece de determinante para el color de los ojos, los machos tendrían los ojos blancos cuando heredaran de su madre un cromosoma X mutado. El carácter *white* fue el primer gen en asignarse a un cromosoma específico.

Si Columbia era la meca de la citogenética de la mosca, R. A. Emerson había convertido a Cornell, desde 1914, en el centro de referencia de la citoge-

nética del maíz, el otro pilar experimental sobre el que se asentaba la genética clásica. En esta gramínea de 20 cromosomas el entrecruzamiento se produce lo mismo en la meiosis masculina que en la femenina. A su profundización se entregó George Wells Beadle. Nacido en 1903 en el seno de una familia campesina de Wahoo (Nebraska), en 1922 entró en la Escuela Superior de Agricultura de Lincoln, donde la enseñanza de una botánica centrada en la sistemática había cedido el paso a una disciplina fundada en el microscopio y la mejora. Los alumnos aprendían a realizar cruces, predecir el fenotipo y deducir el genotipo de la progenie, a determinar los alelos dominantes y los recesivos. Beadle prosiguió sus estudios en Cornell, donde se licenció el mismo año de 1927 en que Muller descubría que la exposición de las moscas a los rayos X inducía mutaciones. Con otras palabras, los genes se revelaban como entidades físicas, cuya estructura podía alterarse a través de la radiación. Por entonces también, L. J. Stadler descubría el poder mutagénico de los rayos X en el maíz y la cebada; más tarde, extendería esa facultad a la radiación ultravioleta. La mutagénesis inducida por rayos X y por UV se convirtió en arma poderosa para el hito revolucionario posterior de Beadle.

Desde el comienzo de su estancia en Cornell, acometió dos líneas de investigación; por un lado, la relación entre el maíz y el teosinte, una planta silvestre de América Central; por otro, las mutaciones asociadas con la esterilidad del maíz, cuestión que habría de conformar el nervio de su doctorado. Se sabía que algunas plantas mutantes carecían de anteras. De acuerdo con las leyes de Mendel, los progenitores normales de la descendencia mutante portaban un alelo funcional y otro no funcional del gen esencial para la producción de polen. La progenie que heredaba dos alelos no funcionales producía polen infértil. Beadle se propuso investigar no sólo las pautas formales de la esterilidad congénita, sino también aplicar la citogenética al estudio del mecanismo subyacente bajo la incapacidad de las plantas mutantes estériles. Con ayuda de Barbara McClintock halló que, en las mutantes, los cromosomas de los gametos no se alineaban en pares. Ello significaba que el proceso para crear polen funcional abortaba en fase muy precoz, lo que explicaba la esterilidad de la planta. A ese gen le llamaron asináptico, porque el alelo mutante obstruía el emparejamiento cromosómico meiótico normal: es decir, la sinapsis. Beadle se encontró con que un gen podía controlar el comportamiento cromosómico. ¿Por qué un solo gen

Matemática romántica

ABEL'S PROOF. AN ESSAY ON THE SOURCES AND MEANING OF MATHEMATICAL UNSOLVABILITY, por Peter Pesic. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts/Londres, 2003.

El día 3 de junio de 2003 se concedía al matemático francés Jean-Pierre Serre el primer premio Abel de matemáticas. Dicho premio había sido acordado por la Niels Henrik Abel Memorial Fund el 1 de enero de 2002 con un valor de 760.000 euros. La Academia Noruega de Ciencias y Letras lo adoptó para suplir la falta de un premio Nobel de matemáticas. Era un homenaje a Niels Henrik Abel (1802-1829), en el doscientos aniversario de su nacimiento. Junto con el matemático francés Evariste Galois (1811-1832), es uno de los matemáticos más jóvenes de la historia y uno de los matemáticos románticos.

Las aportaciones de este joven matemático son muy importantes en el campo de las funciones elípticas, una generalización de las funciones trigonométricas. Sin embargo, por lo general es conocido como el primer matemático que dio una demostración rigurosa y completa de la imposibilidad de resolver la quíntica general por medio de radicales de expresiones algebraicas de sus coeficientes. Este resultado, además, está ligado con las investigaciones de Galois que permiten saber qué quínticas son resolubles por radicales.

Un homenaje, menos notable que el de la Academia Sueca, pero más extenso, consiste en lograr que su trabajo sea comprendido, apreciado y valorado por intelectuales curiosos. Ello requiere disponer de una exposición divulgativa, que sea a la vez didáctica y rigurosa, amena y formativa, sintética y ampliable. Este es el homenaje a Abel que ofrece el libro de Pesic.

A través de un recorrido histórico de los problemas y conceptos que, desde la Grecia antigua, habían de permitir a los eruditos de todos los tiempos y civilizaciones establecer y comprender la naturaleza de las ecuaciones polinómicas, le permite llevar de la mano al lector hasta el resultado de Abel relativo a la irresolubilidad de la quíntica. En el Apéndice B, nos ofrece el texto íntegro de Abel, comentado para su mejor comprensión. Es un texto relativamente simple para un estudiante de primeros cursos de matemáticas —un lector más genérico puede omitir su lectura así como la de los otros apéndices técnicos—, que ha sido olvidado en las presentaciones académicas de este resultado porque se halla subsumido en la teoría de Galois —una teoría más general— como simple corolario. Pesic ofrece una aproximación a los conceptos básicos de esta teoría, vinculándolos intuitivamente a los cinco sólidos platónicos y sus grupos de transformaciones.

La pequeña obra de Pesic va acompañada de una excelente referencia bibliográfica en la que, por medio de notas explicativas, amplía los contextos históricos y conceptuales, algunos de los cuales sólo se hallan esbozados. La totalidad de las notas constituye una auténtica historia del álgebra de las ecuaciones polinómicas, sus problemas y soluciones.

En estos momentos en que el conocimiento aplicado y técnico parece que quiere imponerse al conocimiento abstracto y en que las figuras —que nunca valen más que mil palabras, quizá ni más que una— pretenden reemplazar la reflexión íntima, intelectual, forjada en el estudio y la comprensión, por la inmediatez de la imagen, estoy convencido de que textos homenaje como éste harán renacer aquel espíritu pare el cual lo importante era plantear y resolver problemas matemáticos que encierran un interés de coherencia interna y una mejor comprensión de la naturaleza de los conceptos involucrados.

—JOSEP PLA I CARRERA

de un par de cromosomas podía alterar las condiciones fisiológicas que acarrean el fracaso de la sinapsis de todos los cromosomas? No supo la repuesta entonces. Once años más tarde, cuando la obtuvo, abrió las puertas a la genética molecular. (Hoy sabemos que muchos genes y sus proteínas correspondientes son necesarios para las sinapsis correctas.)

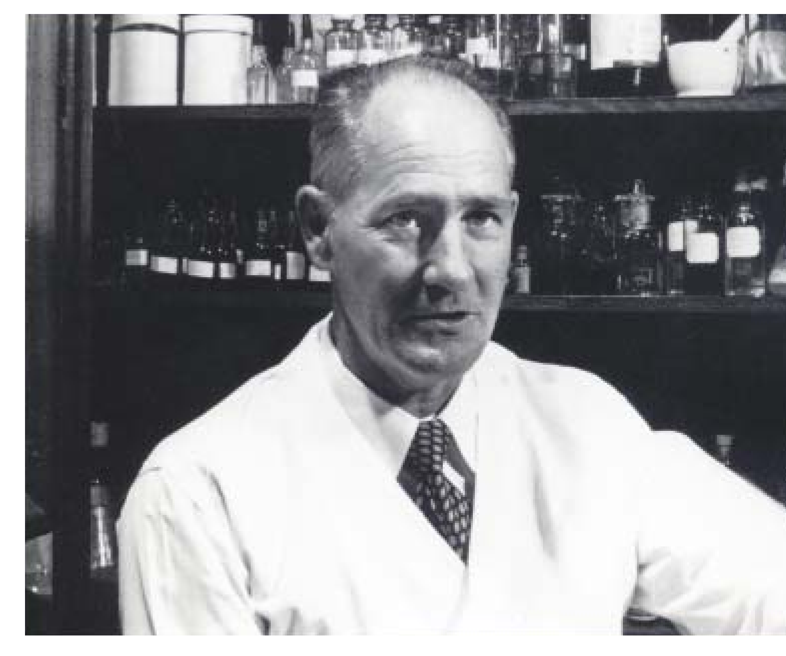
Además de la mutación asináptica, estudió otra mutación recesiva, estéril. Se la denomina polimitótica porque se manifiesta en divisiones celulares anormales avanzada la meiosis. Autopolinizó plantas híbridas que contenían un alelo normal y un alelo mutante polimitótico; aparecieron en la proporción de tres normales a uno polimitótico en la progenie, el resultado típico de un carácter recesivo. Presentó la tesis en octubre de 1929, bajo el título "Genes Affecting Meiosis in Maize"; en sus 28 páginas, describía el trabajo realizado sobre la mutación asináptica y pasaba revista a otras mutaciones que afectaban al comportamiento meiótico de los cromosomas en otros organismos, incluido *Drosophila*.

En el verano de 1928 Morgan fue nombrado director de la división de biología del Instituto de Tecnología de California (Caltech). Se le sumaron Sturtevant y Bridges, así como Albert Tyler, C. C. Lindegren y Jack Schultz. Con la idea de incluir aspectos evolutivos se reclutó a otro investigador de Columbia, Theodosius Dobzhansky. Y a Pasadena acudió Beadle para iniciar su carrera profesional. Mientras terminaba varios trabajos relacionados con la genética del maíz, Schultz y Dobzhansky le introdujeron en las técnicas de investigación en *Drosophila*. Sturtevant le sugirió que abordara el fenómeno del entrecruzamiento entre cromosomas homólogos de la mosca. En concreto, si se daba en unas regiones con mayor frecuencia que en otras. Se dispuso, pues, a comparar la probabilidad de entrecruzamiento entre dos cromosomas homólogos en la vecindad del centrómero con la probabilidad de entrecruzamiento en zonas alejadas de ese punto. Sus experimentos resultaron inequívocos: la frecuencia de entrecruzamientos era mucho menor en la vecindad del centrómero.

Pero se trataba de una línea de investigación que parecía agotada en sí misma. Más sugestivo se le ofrecía el papel de los genes en el desarrollo embrionario. Por eso cuando, en 1934, Boris Ephrussi, del Instituto de Biología Físico-Química de París, llegó a Pasadena con una beca Rockfeller, acordaron estudiarlo conjuntamente. Para aumentar sus conocimientos de embriología, marchó en 1935 al laboratorio de Ephrussi en París. Comenzaron los experimentos. Conocían la existencia de los discos imaginales, grupo de células embrionarias de las larvas que se trasforman durante el desarrollo en tejidos de la mosca. Esos grupos de células pueden transferirse de una larva a la cavidad abdominal de otra, manteniendo su potencial de desarrollo. Se propusieron averiguar si esos botones celulares desarrollaban un tercer ojo en la cavidad abdominal. Lo consiguieron. A medida que profundizaban en esa línea se encontraron con varios mutantes; en particular, con las mutaciones *vermilion* (*v*), *cinnabar* y *claret* (*ca*), relativas a la coloración o pigmentación de los ojos.

De nuevo en Estados Unidos, se procuró la ayuda de Edward L. Tatum para desentrañar la naturaleza química de los pigmentos. Tatum se empeñó en la consecución de sustancias puras *v* y *cn*. Una vez Beadle y Tatum habían logrado la sustancia *v*, esperaban deducir muy pronto su estructura química. Pero Adolf Butenandt se les adelantó. El alemán sometió a prueba una serie de intermediarios del metabolismo del triptófano para la actividad de la sustancia *v*. Uno de ellos, la kynurenina, restablecía el color normal en mutantes del color de los ojos de *Drosophila*. Tatum no se había percatado de la kynurenina porque el material cristalino que él obtuvo de los cultivos de *Bacillus* fue kynurenina combinada con sacarosa.

Beadle reconoció que, si se descubrían las mutaciones que causaban déficits de nutrientes, podrían vincular la acción del gen con procesos metabólicos. Mas, para ello, necesitaban un organismo que tuviera las mínimas exigencias nutritivas posibles. Un organismo que además fuera sensible a agentes mutágenos radiactivos. Debería, además, ser susceptible de un análisis génico inmediato, de suerte que la carencia pudiera atribuirse a un gen. Su plan consistió en crear mutaciones que provocaran requerimientos nutritivos detectables. De ese modo, podría relacionarse una mutación particular con una función definida, ya que cada proceso es la consecuencia de muchas reacciones consecutivas, cada una de ellas catalizada, facilitada o estructuralmente dependiente de una o varias proteínas. Pero las moscas no eran el modelo adecuado para esas prácticas experimentales. Tatum reparó en *Neurospora crassa*, ascomiceto con cuya genética estaba ya familiarizado, de sencillas exigencias nutritivas. Irradiaron las esporas con diversas intensidades de rayos X. Hallaron tres mutantes con déficits nutritivos. Un mutante requería la vitamina B (piridoxina), otro no podía crecer si faltaba ácido p-aminobenzoico (un componente del ácido fólico) y el tercero necesitaba la vi-



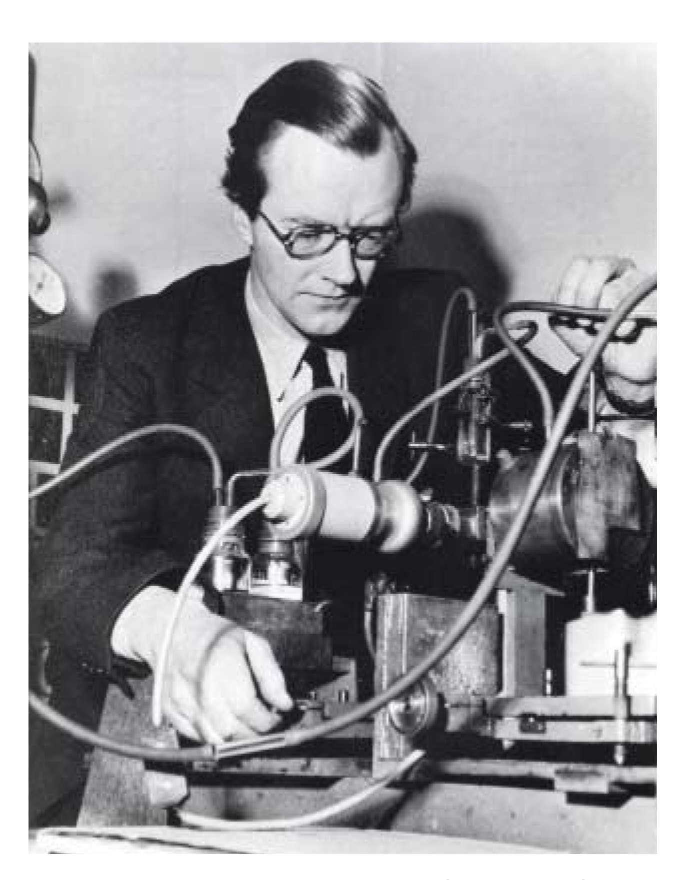
George W. Beadle en el laboratorio

tamina B1 (tiamina). Sabían que la vitamina B1 constaba de dos partes —un tiazol y una pirimidina— y habían ya determinado que este mutante era incapaz de fabricar la porción pirimidínica. El artículo apareció en 1941. Las propiedades singulares de *Neurospora* aportaban un horizonte para explorar no sólo el control genético de los rasgos morfológicos, sino también el control del metabolismo: un gen dirigía la producción de una proteína, en su caso una enzima.

Poco después se demostró que los genes constaban exclusivamente de ADN, no de ADN y proteína o de proteína solo, como Beadle pensara con muchos otros. Apenas unos años más tarde, se identificó la estructura helicoidal del ADN y los mecanismos biológicos de su replicación (*The Third Man of the Double Helix*). Tras el primer relato sobre el descubrimiento de la estructura del ADN, la controvertida *The Double Helix*, de James Watson, en 1968, vino *What Mad Pursuit* de Francis Crick. Ahora Maurice Wilkins ha escrito su descargo de conciencia que completa la trilogía de los que recibieron en 1962 el Nobel por esa hazaña. Tres aportaciones imprescindibles para entender qué sucedió, qué aportó cada uno y qué resentimientos o complejos de culpa guardan todavía sus protagonistas. La exposición de Wilkins gana en interés cuando se lee teniendo abierto el cuaderno epistolar *Genes*, *Girls and Gamow*, de Watson. Si le preocupa al primero dejar clara su anticipación en determinados momentos del proceso investigador, diríase que al segundo le aguijonea todavía la espina de un comportamiento cuanto menos extraño. El pasaje en que Watson recuerda un alto en cierta excursión alpina en agosto de 1954, y se encuentra con otra expedición en la que iba Seeds (del laboratorio de Wilkins), quien le espeta sin detenerse “How is Honest Jim?”, resulta más elocuente que una larga exculpación.

Maurice Wilkins nació en la neozelandesa Pongoroa en 1916. Tras estudiar física en Cambridge, se trasladó a la Universidad de Birmingham para trabajar con John T. Randall en termoluminiscencia. De acuerdo con la mecánica cuántica, un electrón puede viajar libremente a través de un cristal regular, pero quedará atrapado en una irregularidad. Si se calienta el cristal, el electrón saltará a la libertad y emitirá luz. Pero los cristales podrían espontáneamente emitir luz también, cierto tiempo después de que hayan absorbido energía; la emisión retardada se denomina fosforescencia. Esa línea de investigación de Wilkins halló aplicación inmediata en el desarrollo de pantallas de radar durante los inicios de la segunda guerra. Participó también en el proyecto Manhattan. Se le encomendó entonces la vaporización del uranio.

Tras la guerra, se interesó por la biología molecular desde una óptica física, atraído por el pensamiento de Schrödinger expuesto en *What is Life*?, que unía la idea de gen con el mundo de los electrones que se mueven en los cristales. Para Schrödinger, el gen era un cristal aperiódico. Asoció ese carácter “aperiódico” con las irregularidades locales en las que aparecía escrito el mensaje genético, frente a un fondo periódico. Se conocía que el ADN tenía un notable peso molecular, formaba una hebra larga y estaba constituido por



Maurice Wilkins ajustando la posición de una cámara de rayos X para maximizar la intensidad de los rayos X que inciden sobre la muestra

grupos fosfato, anillos de azúcar y bases nitrogenadas. Pero se ignoraba la organización tridimensional de estos componentes en la hebra. Los estudios de rayos X de Bill Astbury avanzaron los primeros pasos para resolver el misterio.

En el King’s College se creó entonces un laboratorio de biofísica, donde el grupo de Randall se fijó como objetivo averiguar de qué modo el ADN realizaba copias de sí mismo y controlaba el desarrollo celular. Puesto que el ADN absorbía la luz ultravioleta podía observarse, con el microscopio ultravioleta, el movimiento del ADN célular. Recién establecida la unidad de investigación, solicitó un puesto en la misma un flamante licenciado en física, Francis Crick. Randall lo rechazó por reputarlo demasiado locuaz. “Me dijo, recuerda Wilkins, que estaba yo perdiendo el tiempo con el ADN y por qué no me ocupaba de cosas más interesantes, como las proteínas.” Se le aceptó en el laboratorio de Max Perutz, dedicado a la estructura de las proteínas.

Dispusieron en King’s College de óptimas muestras de ADN remitidas por Rudolph Signer, desde Berna. Observadas al microscopio, las fibras mostraban una extraordinaria uniformidad y transparencia. Parecía obvio que debían poseer una estructura regular. Si era regular, sería cristalina y podría estudiarse por difracción de rayos X. Emitirían, por tanto, un patrón de difracción de rayos X muy definido, lo que ayudaría a esclarecer la verdadera naturaleza de la molécula de

ADN. Las placas de difracción de rayos X no son como las radiografías al uso, que muestran los huesos; antes bien, muestran pautas de manchas a partir de las cuales puede inferirse la estructura interna del espécimen mediante una larga secuencia de cálculos. Cuanto más regular es la estructura, más definido es el patrón de difracción. Así descubrió, con Raymond Gosling, que el ADN era cristalino. Cabía, pues, deducir la estructura del mismo a través del patrón de difracción. Hacia 1950 Gosling y Alec Stokes midieron la posición de todas las manchas del patrón e infirieron que las moléculas de ADN se hallaban en una disposición cristalina monoclínica (es decir, orientada en una sola dirección). Gosling confirmó que las moléculas se apilaban unas sobre otras; Stokes sugirió que podría tener una estructura helicoidal.

En la primavera de 1951 Wilkins acudió, en representación de la unidad, a dos conferencias internacionales, una en Italia y la otra en EE.UU. En Nápoles mostró el primer patrón cristalino de rayos X de ADN. Entre los asistentes se encontraba James (Jim) Watson, quien acababa de terminar su tesis de graduado con Luria sobre el efecto de las radiaciones en la reproducción del bacteriófago. Watson se interesó por las fotografías y le manifestó a Wilkins su deseo de trabajar en química estructural de ácidos nucleicos y proteínas. Luria le buscó una plaza en el Cavendish. En el King's se avanzaba ya con la idea de que el ADN de todos los organismos se ajustaba a un patrón común, una estructura universal que se retorcía en hélice. Se cuantificó el diámetro de la escalera y el ángulo de ascensión de la hélice. La segunda conferencia, en el marco de las famosas reuniones Gordon, contó con la presencia de Erwin Chargaff, interesado en los estudios de difracción del ADN realizados en el King's. Chargaff había hallado que, de las cuatro bases, guanina siempre se presentaba en la misma cuantía que citosina, y adenina en la misma cuantía que timina. Pero no sugirió que esas proporciones 1:1 se lograran por apareamiento.

Hacia septiembre de 1951, Rosalind Franklin, contratada un año antes por Randall, había descubierto un tipo muy diferente de difracción cuando el ADN se encontraba muy humedecido. Se trataba del B-ADN. Hasta entonces contaban sólo con el patrón cristalino de A-ADN. Franklin creía que las moléculas de ADN podían existir en dos estructuras diferentes; cambiando la humedad, una podía pasar al estado de la otra. Un mes después, se desarrolló en el King's una sesión de revisión sobre el trabajo realizado en difracción por rayos X del ADN. Watson pidió asistir. Wilkins aludió a la forma helicoidal del ADN y quizá, también, a los resultados de Chargaff. Stokes describió la función de Bessel de la estructura helicoidal; Franklin expuso de manera magistral diversos aspectos de la estructura del ADN. (El borrador de Franklin para esa conferencia, donde analizaba la estructura helicoidal, se descubrió después de su muerte. Muestra con toda nitidez que, antes de que Watson y Crick construyeran su doble hélice, ella había pensado en un ADN helicoidal de doble cadena.) Wilkins le daba vueltas al apareamiento de bases.

Un año después ocurrió el obscuro episodio de la fotografía de la discordia. Todo el mundo está de acuerdo en que constituye un documento decisivo para determinar la estructura de doble hélice. La había tomado Franklin y estaba guardada en su cajón. De allí la rescató Gosling. En los primeros días de febrero visitó Watson el King's. Wilkins se la enseñó. "Yo me fiaba de la integridad de Watson".

Aunque Watson no tenía por entonces suficiente preparación cristalográfica, Crick llevaba varios años dominando esas técnicas. Incluso se había permitido algún litigio con el director del centro, Lawrence Bragg (*The Common Purposes of Life*). La cristalografía de rayos X había nacido en la Regia Institución Londinense, cuna de numerosos adelantos en su dilatada historia. Sin la escuela allí formada por William y Lawrence Bragg no se entiende el desarrollo de la biología molecular.

Hubo, en efecto, dos poderosas escuelas estructurales. La británica de los Bragg y la norteamericana de Linus Pauling. Entre ambas mediaba una diferencia fundamental. Pauling confiaba en que la mecánica cuántica pudiera utilizarse como prueba y guía en la selección de estructuras moleculares probables y, en particular, para aceptar o rechazar las distancias de enlace y ángulos derivados de las placas de difracción de rayos X. Los británicos pensaban que era posible la investigación directa de las proteínas cristalinas y que la cristalografía de rayos X aportaba los medios para ello. Maurice Ponte y Marcel Mathieu llevaron a Francia los métodos de los rayos X aprendidos en el laboratorio de los Bragg. Jacques Mering, un discípulo de Mathieu, le enseñaría dichas técnicas a Rosalind Franklin.

Tras la guerra, Lawrence reorganizó el departamento del Cavendish en el que trabajaban Kendrew y Perutz. Explícitamente impuso la norma del respeto por la línea de investigación de otros laboratorios. Si el King's se dedicaba al ADN, el Cavendish debía ceñirse a las proteínas. Sólo cuando comprobó que el trabajo de Crick y Watson corría peligro de que fuera superado por el de Pauling, viejo rival suyo que le ganó la partida en la estructura de las proteínas, y tras consultar con el especialista en ácidos nucleicos Alexander Todd, envió el artículo de aquéllos a *Nature*, que apareció el 25 de abril de 1953.

Pero cuando, en 1968, se le solicitó su arbitraje para que mediara entre Crick y Watson a propósito del libro *The Double Helix*, aceptó a condición de que Watson cambiara el título original *Honest Jim* por el que finalmente tomó. Al propio tiempo, el director de Harvard University Press dio instrucciones para retirarlo de su plan de ediciones. A comienzos de 1968 *The Double Helix* fue publicada por dos editoriales comerciales, Athenaeum de Nueva York y Weidenfeld y Nicolson de Londres.

Tras concluir el desciframiento de la estructura de doble hélice, Watson se propuso alcanzar un éxito no menor con el descubrimiento de la estructura y función del ARN. Si el lector resiste su carteo con Christa y los altibajos de esa relación amorosa (*Genes, Girls and Gamow*) podrá disfrutar al final de una búsqueda, aquí sin término, pero apasionadamente científica.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Expolio estratégico

En los patios de los colegios, en el mundo del delito y en las relaciones internacionales, los hay que buscan hacerse por la fuerza con los bienes ajenos. Atacan con deleite cuando su superioridad es aplastante y la víctima merece la pena. En ocasiones, grupos o individuos —"entidades"— suman sus fuerzas, aliándose durante algún tiempo, sea para enriquecerse a costa de lo ajeno, sea para disuadir a posibles atacantes.

Supongamos válidas las reglas siguientes: la fuerza de una entidad está representada por un número; si dicha entidad es una coalición, su fuerza será igual a la suma de las fuerzas de quienes la integran. La entidad A solamente se decidirá a atacar a la B si tiene la certeza de vencer (es decir, si la fuerza de A es mayor que la de B.) Cuando una entidad queda derrotada, los vencedores adquieren sus riquezas, pero no su fuerza. Cada entidad actúa de forma egoísta, buscando apoderarse de riquezas y evitando la propia destrucción. Se dice que una configuración de fuerzas es estable si no llega a producirse ninguna lucha; así ocurrirá si puede formarse una coalición lo bastante fuerte como para disuadir de la lucha y si la lealtad a esa coalición fuese lo más conveniente para cada uno de sus miembros.

Supongamos que los valores de las fuerzas sean 4, 2, 1. Tal configuración es inestable, porque si 4 lucha contra 2 y 1 los vencerá, se alíen o no. En cambio, si fuesen 4, 2, 1, 1, la configuración sería estable, pues una coalición de 2, 1 y 1 disuade a 4 de atacarles. Por otra parte, si alguno de los coaligados fuese destruido, los demás lo serían también, por lo que cada aliado tiene serios motivos para permanecer en la coalición.

Como ejercicio preliminar, examinemos la configuración 5, 4, 4. ¿Es estable? ¿Lo es la 5, 4, 3? La configuración 5, 4, 4 es inestable porque los dos 4 podrían unirse contra 5. Tras repartirse los bienes de 5, se escindirían en una configuración 4, 4, que es estable (es, de hecho, invencible). La configuración 5, 4, 3 es estable, porque ninguno de sus miembros puede asegurarse con impunidad la victoria.

He aquí el problema. Si el valor máximo de la fuerza puede ser 21, ¿cuál será el mayor conjunto de fuerzas distintas (números enteros, todos diferentes entre sí) que resulte estable? ¿Y si esos enteros no tuvieran que ser todos distintos?

Otro problema más. Ciertas entidades pueden tener un "aguijón," es decir, una capacidad de represalia capaz de destruir incluso a una fuerza superior. Ahora bien, al igual que las abejas, quienes utilicen el aguijón morirán en la batalla junto a su enemigo. Por ejemplo, si un 5 atacase a un 4 que tiene aguijón, tanto el 5 como el 4 perecerán. Por lo tanto, el 5 no atacará. La capacidad de represalia parece ser estabilizadora de por sí, pues disuade del ataque. ¿Cabría, sin embargo, que la adquisición de esta capacidad tornase inestable una configuración?

Solución del problema del mes pasado:

Para hallar al excursionista perdido, se parte a dos kilómetros al oeste del vértice inferior derecho y se sigue la ruta indicada en la ilustración. La longitud total de esa ruta es de unos 29,31 km, por lo que la expedición de auxilio detectará la señal del excursionista en un máximo de 293,1 minutos.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



SOLUCION DEL EJERCICIO: Una configuración 5, 4, 3 es estable, porque la paz es lo que más conviene a todos.

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2003.*

MATERIAS

AUTORES





EL GENOMA INVISIBLE, por W. Wayt Gibbs

Cuando se creía que se habían conseguido todos los datos del ADN, han aparecido dos capas amplias de información en los cromosomas, en buena parte ocultas, y que afectan a la herencia, desarrollo y enfermedad.



UN EJERCITO DE ROBOTS, por Robert Grabowski, Luis E. Navarro-Serment y Pradeep Khosla

Para los diseñadores de robots de hoy día, lo pequeño no sólo es hermoso, sino que ofrece grandes posibilidades técnicas.

EL REMOLCADOR DE ASTEROIDES, por Russell L. Schweickart, Edward T. Lu, Piet Hut y Clark R. Chapman

¿Qué hacer ante la amenaza de que un asteroide choque contra la Tierra? Entre las opciones se sugiere un remolcador espacial equipado con motores de plasma.

PIONEROS EN NUEVOS TERRITORIOS, por Kate Wong

Los excepcionales descubrimientos en yacimientos de la república de Georgia obligan a descartar muchas de las hipótesis sugeridas sobre la primera salida de los homínidos fuera de Africa.



RESONANCIA KONDO, por O. Yu. Kolesnychenko, M. I. Katsnelson, A. I. Lichtenstein y H. Van Kempen

La espectroscopía por barrido túnel, método ideal para investigar las estructuras atómicas y electrónicas, saca a la luz la intrincada naturaleza de las superficies del cromo.



EL VUELO CON ALAS FLEXIBLES, por Steven Ashley

La técnica vuelve a dirigir su mirada a la naturaleza. El vuelo de los futuros aviones podría remedar mejor el de las aves, adoptando la geometría de alas que más convenga en cada momento a las variaciones de las condiciones de vuelo.



LA CONSTANTE DE HUBBLE Y EL UNIVERSO EN EXPANSION, por Wendy Freedman

El valor de H_0, la velocidad de expansión del universo, podría, merced a su refinamiento reciente, allanar el camino de la investigación cosmológica.

¿POR QUE DORMIMOS?, por Jerome M. Siegel

Paso a paso van saliendo las razones del sueño reparador.

EL FUTURO DE LA TEORIA DE CUERDAS, por Brian Greene

¿En qué situación se encuentra nuestro conocimiento sobre la teoría radical del espacio y el tiempo, los universos múltiples y otras cuestiones disputadas?